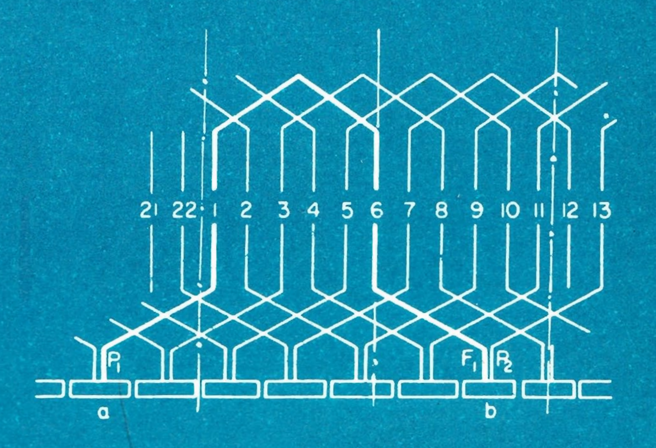
alfonso
martignoni

MÁQUINAS ELÉTRICAS DE CORRENTE CONTÍNUA





SUMÁRIO

Capítulo III

Capítulo IV

Capítulo V

Capítulo VI

Capítulo VII

Capítulo VIII

Capítulo IX

Capítulo X

CAPÍTULO I

1 — Utilização da corrente contínua

A corrente contínua encontra aplicação em vários setores industriais, como por exemplo: — instalações de eletroquímica, carregamento de baterias de acumuladores, tração elétrica, eletromagnetos industriais, satélites artificiais e foguetes espaciais.

Nos satélites artificiais e foguetes espaciais, a corrente contínua é produzida por meio de baterias alimentadas por fotocélulas. Estas últimas captam a energia luminosa do sol e a transformam em energia elétrica com corrente contínua.

Em certos tipos de engenhos espaciais estão sendo experimentadas as "pilhas de combustível", que transformam a energia química de algumas substâncias, como amoníaco, propano, metano, etc., em energia elétrica com corrente contínua.

Nas instalações de eletroquímica, a corrente contínua é obtida por retificação da corrente alternada por meio de tungar e retificadores de selênio ou de silício.

Em muitas instalações deste gênero, a corrente contínua é produzida por dínamos, isto é, por máquinas que geram energia elétrica com corrente contínua, utilizando energia mecânica produzida por motores térmicos ou por motores assíncronos.

Na tração elétrica: bondes, *trolleybuses* e trens, a energia elétrica com corrente contínua é obtida por conversão da corrente alternada por meio de conversores a vapor de mercúrio ou por meio de dínamos.

As instalações elétricas dos automóveis, cuja corrente utilizada é contínua, são alimentadas por um dínamo acionado pelo próprio motor do veículo. Os modernos tipos de automóveis, entretanto, tiveram o dínamo substituído por um alternador trifásico, cuja corrente alternada é convertida em contínua por meio de retificadores de silício. A substituição do dínamo pelo alternador é devida ao fato deste último requerer menor manutenção do que o primeiro.

2 — Impossibilidade prática de gerar f.e.m. contínuas por meio dos fenômenos de indução eletromagnética

Para que num condutor elétrico se gere uma f.e.m. é preciso que o mesmo sofra uma variação de fluxo, resultando da lei da indução eletromagnética

$$e = \frac{d\ \phi}{d\ t}$$

Se o condutor rodar num campo magnético, as variações de fluxo norte e sul sucedem-se na rotação, gerando no condutor uma f.e.m. alternada senoidal

$$e = E_M \text{ sen } wt$$

É evidente, portanto, a impossibilidade de se gerarem f.e.m. contínuas por meio de espiras ou bobinas que rodam num campo magnético.

A geração de uma f.e.m. contínua é possível somente num condutor que se desloca sempre no mesmo sentido num campo magnético unidirecional, conforme mostra a Fig. 1.

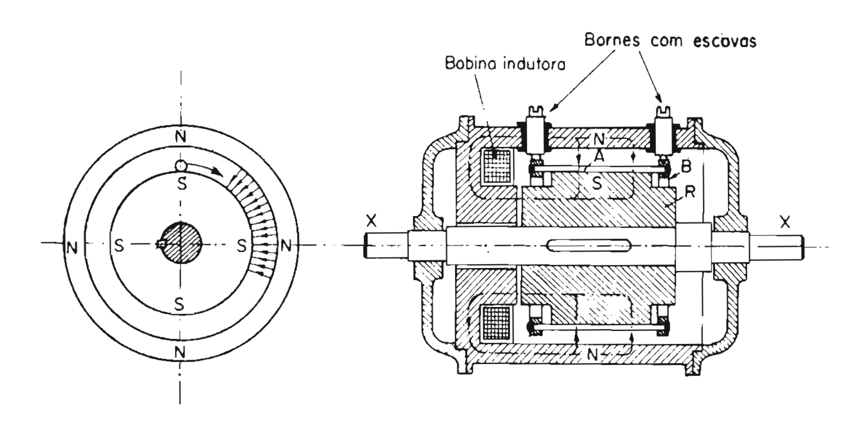


Fig. 1

O princípio em si é simples e não oferece dificuldade de construção: consiste em se colocarem na periferia do rotor *R* vários condutores *A* unidos pelos anéis *B*. Sobre estes dois anéis se apóiam as escovas ligadas aos bornes da máquina.

O dispositivo ilustrado está sujeito a uma limitação intransponível, isto é, a impossibilidade de agrupar em série os condutores rotóricos, com a finalidade de somar as f.e.m. induzidas nos mesmos. Pelo exposto, resulta evidente que este dispositivo não pode ser utilizado para construir uma máquina capaz de gerar uma f.e.m. induzida superior à que se gera num único condutor. Assim sendo, para efeito de aplicações práticas, o princípio exposto é destituído de valor.

A construção das máquinas geradoras de corrente contínua deve ser resolvida por outro caminho, isto é, por meio da conversão das f.e.m.

induzidas nas bobinas rotóricas das máquinas geradoras de corrente alternada. O órgão que permite esta conversão chama-se coletor de lâminas ou comutador.

3 — Conversão das f. e. m. alternadas em contínuas por meio de comutador

Conforme foi examinado no livro *Eletrotécnica*, nos parágrafos 115 e 117, numa espira que roda num campo magnético constante gera-se uma f.e.m. alternada expressa por:

$$e_v = 2 \cdot 10^{-8} \cdot B \cdot l \cdot v \cdot \operatorname{sen} \alpha$$

onde:

B = intensidade do campo magnético.

l = comprimento de cada condutor ativo da espira em cm.

v = velocidade periférica em cm/seg.

sen α = seno do ângulo formado pela direção do campo e a do movimento, conforme Fig. 2.

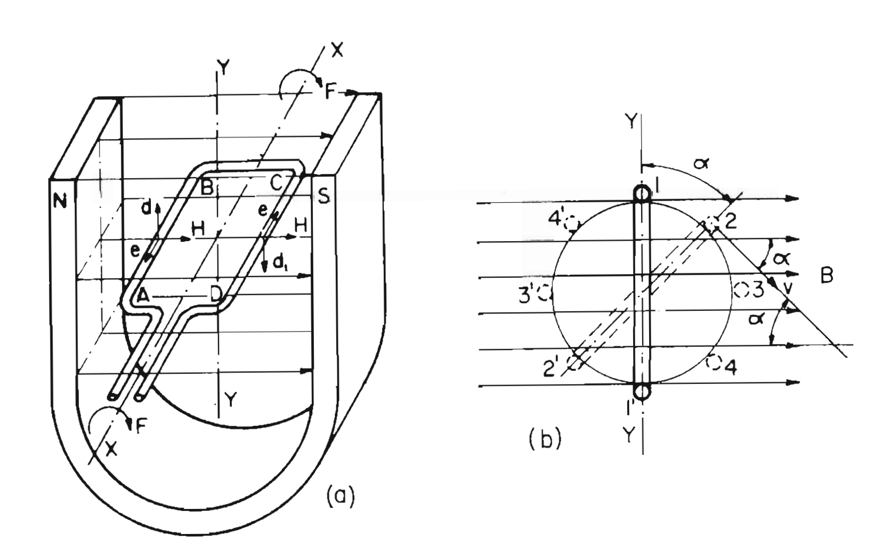


Fig. 2

O ângulo α formado pela direção do campo e a direção do movimento corresponde ao ângulo formado pelo plano da espira e o eixo *yy* normal à direção do campo.

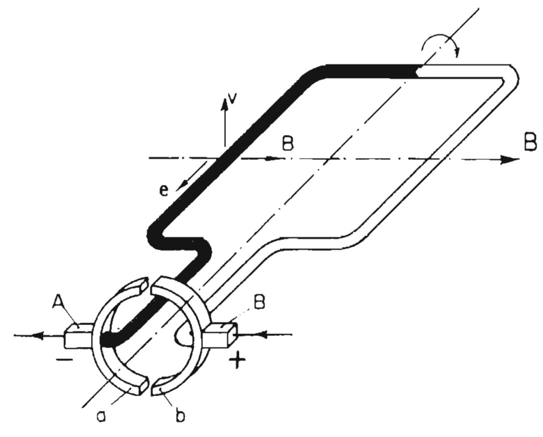


Fig. 3

Se os condutores da espira são ligados a dois segmentos circulares, isolados entre si, que rodam junto com a espira, entre os dois segmentos existirá a diferença de potencial igual à f.e.m. que se gera nos dois condutores ativos da espira. Esta f.e.m. pode ser medida e aproveitada por meio de duas escovas fixas, embaixo das quais deslizam os segmentos circulares, conforme Fig. 3.

Em virtude do sentido do campo e da rotação, a f.e.m. da espira é dirigida para o setor *a*, o qual possui polaridade negativa, enquanto o setor *b* possui polaridade positiva.

Quando a espira estiver na posição 11', Fig. 2 (b), isto é, com os condutores na zona de inversão, sendo $\alpha = 0°$, é nula a f.e.m. induzida na espira. Nesta posição, os dois condutores deslocam-se instantaneamente na mesma direção do campo sem cortar nenhuma linha de força. Exprime-se este fato representando-se com zero o valor da f.e.m. no diagrama da Fig. 4. A partir desta posição, a f.e.m. na espira aumenta, ficando o segmento *b* negativo e o *a* positivo. O valor máximo da f.e.m. é obtido na posição 33', quando sendo $\alpha = 90°$; sen $\alpha = 1$.

O segmento *b* mantém a polaridade negativa e o *a* positiva em toda a semi-rotação compreendida da posição 11' a 1'1. Na posição 1'1 a f.e.m. na espira é nula, pois, sendo $\alpha = 180°$, sen $\alpha = 0$. No decorrer desta semi-rotação, a escova *A* tem polaridade negativa, enquanto a escova *B* tem polaridade positiva.

A partir da posição 1'1 a f.e.m. na espira volta a crescer. O sentido da f.e.m. nos condutores é contrário ao da meia rotação anterior, isto é, o segmento *a* tem polaridade negativa e o *b* polaridade positiva.

As escovas, porém, não estão mais em contato com os mesmos segmentos, pois estes, rodando junto com a espira, mudaram de posição. Por esta razão, também na meia rotação sucessiva a escova *A* continua com polaridade negativa e a *B* com polaridade positiva.

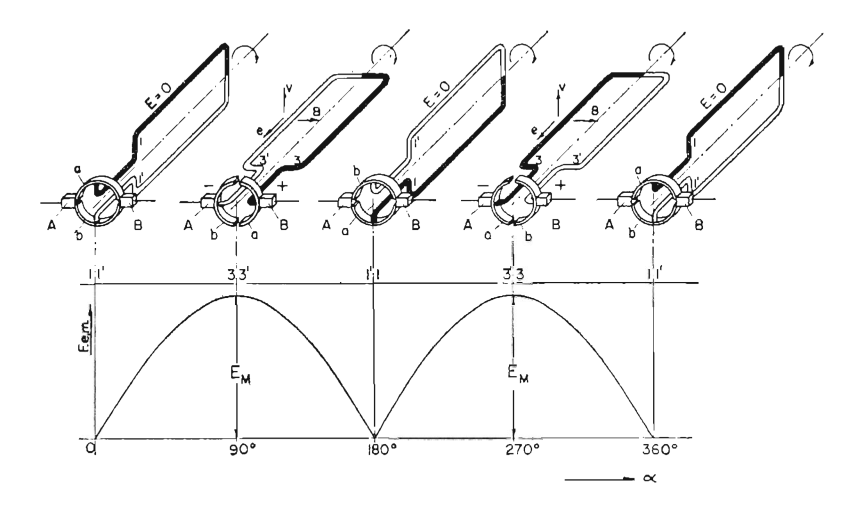


Fig. 4

Conforme o diagrama da Fig. 4 indica, a diferença de potencial existente nas duas escovas *A* e *B* não é contínua, mas possui a característica pulsante, cujo valor **máximo é** $\mathbf{E_M} = 2 \cdot 10^{-8}\mathbf{B} \cdot l \cdot v$.

Se em lugar de uma espira, empregam-se várias, colocadas sobre um cilindro que roda num campo magnético, em cada espira se produzirá o fenômeno antes examinado. As escovas não estarão mais em contato com os segmentos por meia rotação e sim uma fração de rotação, que será tanto menor quanto maior o número das espiras colocadas no rotor.

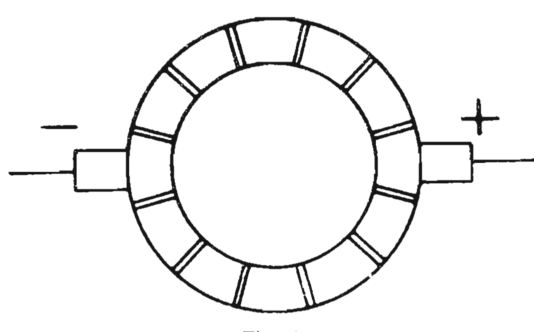


Fig. 5

É compreensível que, se em lugar de uma espira, usam-se várias espiras, tendo cada uma dois segmentos, entre as escovas existirá uma diferença de potencial mais homogênea que a obtida com o emprego de uma única espira. Assim sendo, empregando-se 6 espiras, com 12 segmentos, conforme Fig. 5, cada segmento estará em contato com as escovas por 1/12 de rotação. A forma da diferença de potencial existente entre as escovas é a representada na Fig. 6.

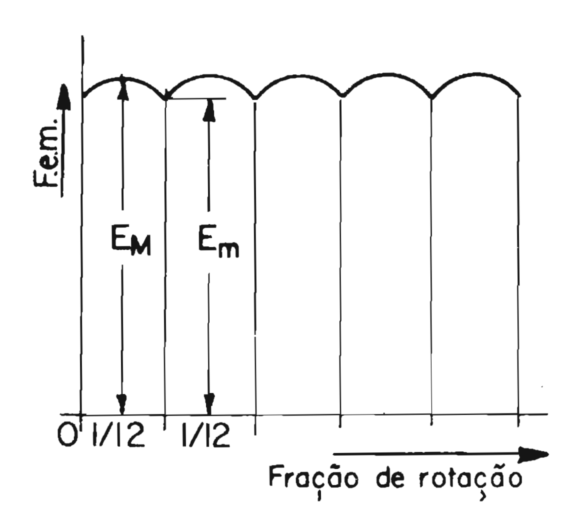


Fig. 6

Se o número das espiras usadas for elevado, elevado será também o número dos segmentos, e a diferença entre o valor máximo E_M e o valor mínimo E_{min} da f.e.m. será muito pequena, o que permite considerar unidirecional constante a diferença de potencial existente entre as escovas.

O conjunto dos segmentos isolados, aos quais são ligados os terminais das espiras, chama-se coletor de lâminas ou comutador.

O dispositivo descrito não é empregado nos induzidos dos dínamos, pois as escovas utilizam a f.e.m. de uma espira de cada vez. Assim sendo, no exemplo indicado cada espira ou bobina é utilizada por 1/12 de rotação, enquanto as demais espiras ou bobinas permanecem inativas. É evidente que com esta disposição os condutores montados no rotor são mal utilizados, o que obrigaria a empregar máquinas extremamente volumosas para produzir energia elétrica de pequena potência.

Os dispositivos indicados a seguir permitem que todos os condutores utilizados no rotor contribuam si-

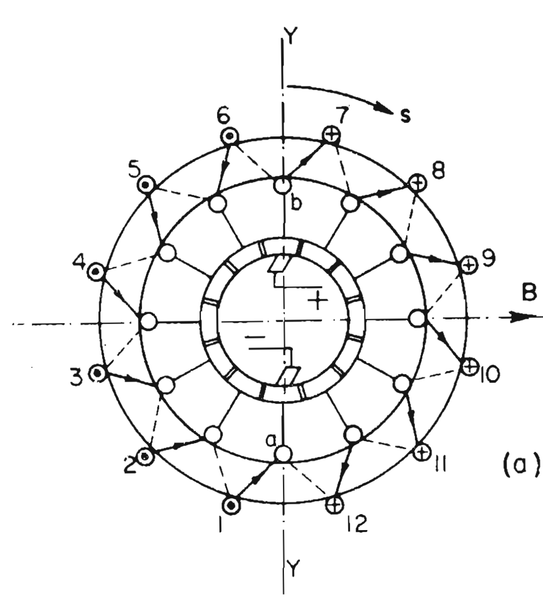
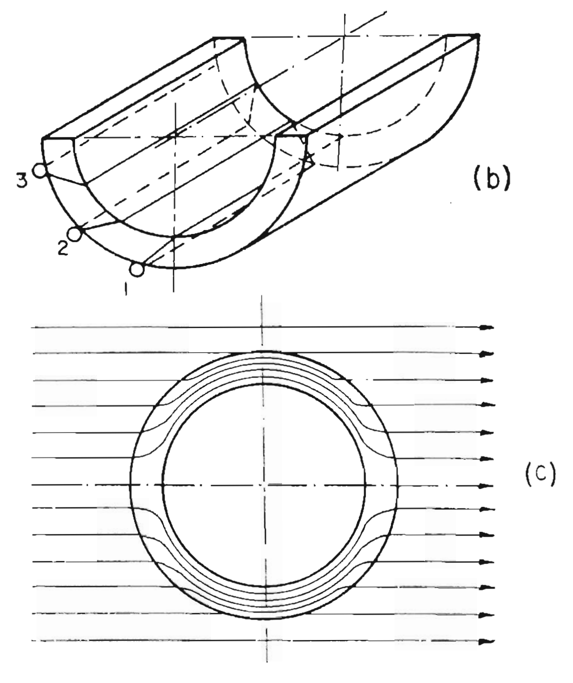


Fig. 7

multaneamente para a produção da diferença de potencial utilizável nas escovas.



4 – Enrolamento induzido tipo anel

Realiza-se este tipo de enrolamento executando-se sobre um anel de ferro determinado número de espiras que se iniciam e terminam no mesmo ponto, de forma que o enrolamento resulte um circuito fechado.

A Fig. 7 (a) indica um enrolamento tipo anel com 12 espiras, que se iniciam e terminam no ponto *a*.

As espiras enroladas conforme Fig. 7 (b) possuem um condutor interno e outro externo ao anel. Os condutores externos no decorrer da rotação cortam as linhas de força do campo magnético indutor, gerando-se nos mesmos as f.e.m. induzidas.

Os condutores internos do anel não participam dos fenômenos da indução eletromagnética, pois, como indica a Fig. 7 (c), no interior do anel não há linha de força. O fluxo magnético fica totalmente canalizado no anel de ferro. Os condutores internos, pelo exposto, são inativos e têm a finalidade de ligar os condutores ativos entre si.

Examinando-se a Fig. 7 (a) observa-se que no ponto (a) convergem as f.e.m. dos condutores 6,5,4,3,2,1, e 7,8,9,10,11,12. Os dois grupos de condutores mencionados resultam em paralelo, ligados em *a* e *b*. A f.e.m. resultante no interior do enrolamento fechado é nula, pois as f.e.m. dos dois grupos resultam iguais e opostas. Pelo exposto, nenhuma corrente pode circular no enrolamento se o circuito externo, utilizador, estiver desligado.

Ligando-se aos pontos *a* e *b*, através das duas escovas, um circuito externo utilizador, nos bornes deste circuito atua a diferença de potencial igual à soma das f.e.m. induzidas nos condutores de 6 até 1 ou de 7 até 12. Esta diferença de potencial fará circular no circuito externo uma corrente que é fornecida em partes iguais pelas duas séries de

condutores agrupados em paralelo. Cada uma das séries de condutores antes mencionados é chamada *via interna do induzido.*

A variação da diferença de potencial existente nas escovas é idêntica à representada na Fig. 6, e pode portanto ser considerada unidirecional constante, isto é, contínua. Esta diferença de potencial mantém, no circuito utilizador, uma corrente contínua dirigida da escova negativa à positiva. Nas vias internas do induzido, a corrente é dirigida da escova positiva à escova negativa e terá como intensidade a metade do valor da intensidade da corrente no circuito utilizador.

No enrolamento indicado na Fig. 7 (a), o comutador possui tantas lâminas quantos são os condutores ativos do enrolamento. Com esta disposição, se o induzido possuir muitos condutores ativos, o comutador será constituído por um elevado número de lâminas, o que tornará difícil a sua construção.

A fim de não se empregar um número elevado de lâminas do coletor, realiza-se a disposição indicada na Fig. 8, na qual entre duas lâminas consecutivas do comutador estão compreendidos vários condutores ativos, isto é, várias espiras.

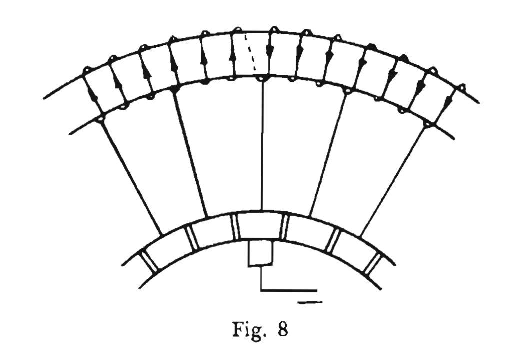


Fig. 8

5 — Posição das escovas no comutador

A máxima diferença de potencial entre as escovas verifica-se quando as mesmas estão em comunicação com os condutores situados na zona magnética de inversão, conforme Fig. 9. Nestas condições, em cada via interna do induzido todos os condutores possuem f.e.m. dirigidas

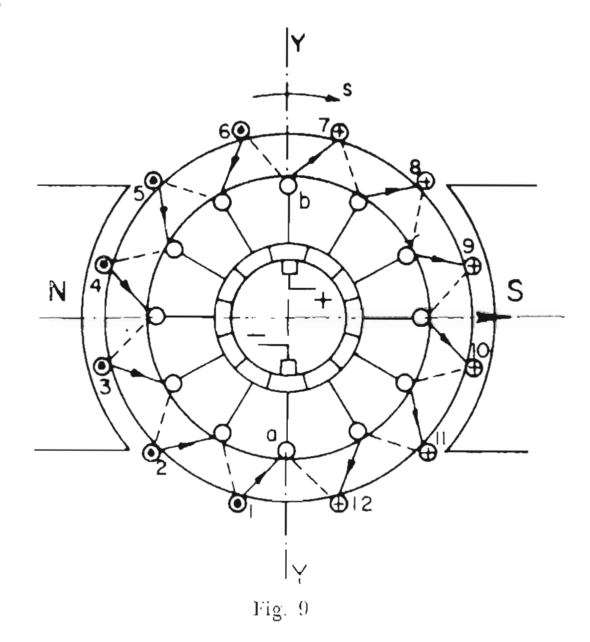


Fig. 9

no mesmo sentido e, portanto, seus efeitos somam-se.

Deslocando as escovas do plano de inversão, conforme Fig. 10, em cada via interna existem alguns condutores com f.e.m. dirigidas em sentido contrário aos demais e, portanto, seus efeitos subtraem-se. No caso indicado na Fig. 10, os condutores opositores são 7 e 8 numa via interna e 1 e 2 na outra.

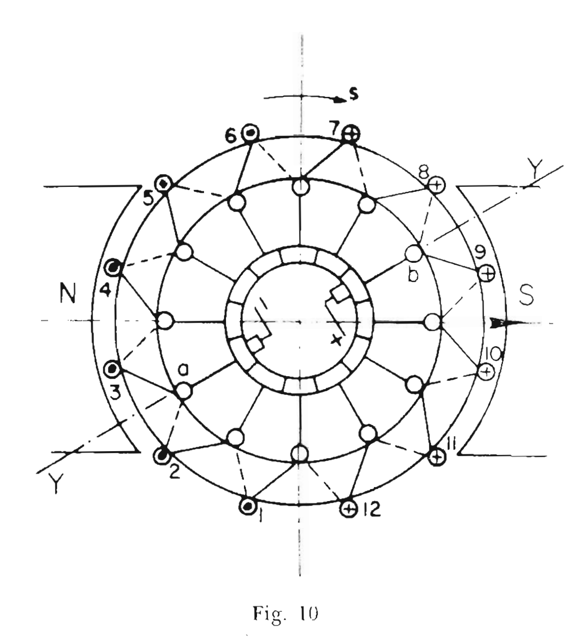


Fig. 10

Deslocando-se as escovas de 90º do plano de inversão, isto é, colocando-as ao longo do eixo polar, a diferença de potencial entre as escovas é nula, pois em cada via interna metade dos condutores terá f.e.m. dirigidas em sentido contrário ao da outra metade.

6 — Enrolamento induzido tipo tambor

Conforme foi observado anteriormente, o enrolamento tipo anel apresenta o inconveniente de possuir condutores inativos. Tais condutores, situados no interior do anel, não tomam parte na geração da f.e.m.; sua função é a de conectar os condutores ativos, e sua presença concorre para a formação de maior resistência elétrica do induzido, maior queda de tensão e maior produção de perdas por efeito joule.

Para evitar os inconvenientes mencionados, recorre-se ao enrolamento induzido tipo tambor, representado nas Figs. 11 (a) e (b), cuja realização é obtida conectando-se convenientemente os condutores distribuídos uniformemente sobre a periferia de um cilindro de ferro.

No exemplo da Fig. 11 foram considerados 12 condutores ativos, a fim de compará-los ao enrolamento tipo anel da Fig. 7. Os condutores distribuídos sobre o cilindro devem ser ligados de maneira a formar um circuito fechado. O que diferencia o enrolamento tipo tambor do enrolamento tipo anel é o fato de o condutor *1* em lugar de ser agrupado em série ao *2* por meio de um condutor inativo, interno ao cilindro, ser ligado ao condutor *8* por meio da conexão frontal posterior (1'-8). O condutor *8* é ligado ao *3* por meio da conexão frontal anterior (8-3).

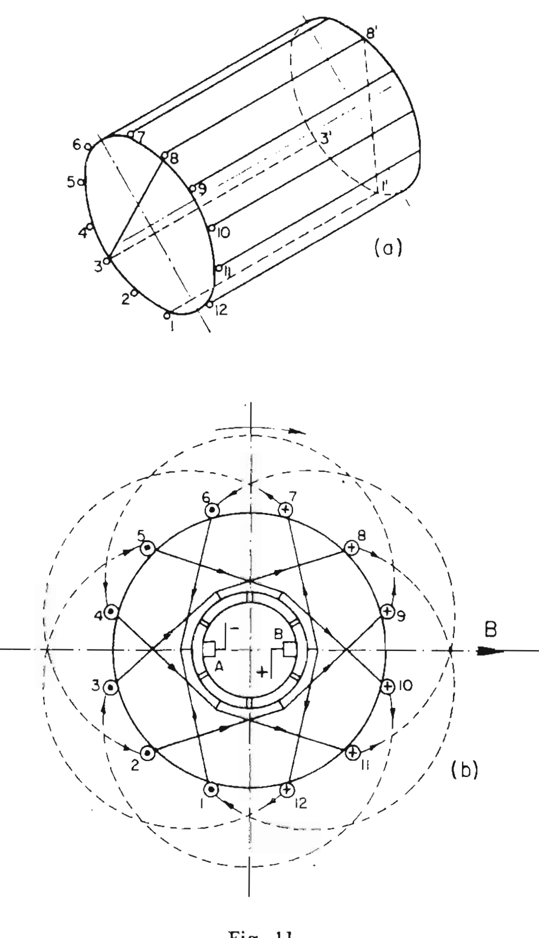


Fig. 11

Com este tipo de enrolamento elimina-se a ligação inativa existente no enrolamento tipo anel, e a ligação 1-8-3 é perfeitamente equivalente à 1-2-3 do enrolamento tipo anel, da Fig. 7.

A Fig. 11 (b) mostra o esquema completo do enrolamento tipo tambor em exame, no qual as conexões frontais posteriores são indicadas **com linhas tracejadas e as frontais anteriores com inteiras. As conexões frontais anteriores efetuam também a ligação com o comutador.**

O fechamento completo do enrolamento resulta da ligação dos condutores na ordem indicada a seguir:

1-8-3-10-5-12-7-2-9-4-11-6-1

As lâminas do comutador, ligadas às conexões frontais, são em número de 6, isto é, uma lâmina para cada par de condutores ativos, ou seja, para cada espira.

As escovas estão em contato com duas lâminas diametralmente opostas, as quais estão ligadas aos condutores próximos da zona de inversão (1-6) e (7-2).

A ordem das conexões para cada via interna do enrolamento tipo tambor da Fig. 11 está indicada na Fig. 12, a qual é obtida partindo-se da escova positiva *B* e percorrendo-se os condutores de cada via interna até alcançar a escova negativa.

A diferença de potencial existente entre as escovas é igual à soma das f.e.m. que se induzem na metade dos condutores, pois, como se pode ver na Fig. 12, o enrolamento é composto de dois circuitos iguais agrupados em paralelo. Cada circuito ou via interna possui a metade dos condutores induzidos.

No enrolamento não há corrente de circulação interna, se o circuito de utilização fôr interrompido, pois, sendo idênticos os dois circuitos agrupados em paralelo, possuem f.e.m. iguais, que se contrapõem. Se, porém, o enrolamento alimentar um circuito utilizador, a corrente por este absorvida será fornecida em partes iguais, pelas vias internas do induzido.

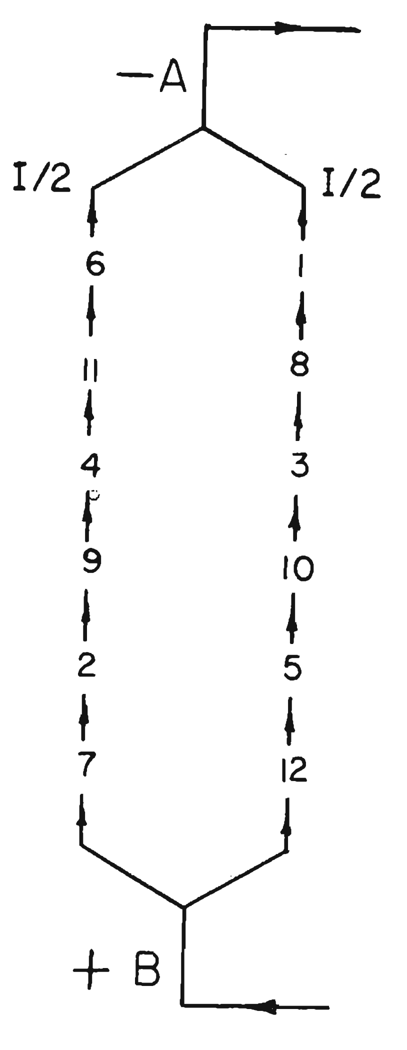


Fig. 12

Resumindo os fatos expostos, pode-se dizer que tanto no enrolamento induzido tipo anel, como no tipo tambor, o circuito dos mesmos resulta fechado e a diferença de potencial existente entre as escovas é igual à soma das f.e.m. induzidas na metade dos condutores induzidos.

A corrente fornecida a um circuito externo é igual à soma das correntes que circulam nos condutores das duas vias internas do induzido.

É evidente que a resistência total do enrolamento medida entre as escovas é 1/4 da resistência complexiva oferecida pelo fio usado antes de ser enrolado.

Também no enrolamento tipo tambor obtém-se a máxima diferença de potencial entre as escovas quando as mesmas estão em comunicação direta com os condutores localizados próximos do plano de inversão magnética, conforme Fig. 11. Nesta posição todos os condutores de cada via interna possuem f.e.m. dirigidas no mesmo sentido. Deslocando-se as escovas do "plano de inversão" no sentido da rotação ou em sentido contrário, a diferença de potencial aproveitável reduz-se, pois em cada via interna haverá condutores cujas f.e.m. se opõem às dos demais.

Vale a pena notar que no esquema da Fig. 11 as escovas estão eletricamente em contato com os condutores próximos do plano de inversão, embora mecanicamente estivessem deslocadas 90º do referido plano. No mencionado esquema as escovas estão localizadas sobre o eixo polar. Como a ligação dos condutores pode ser deslocada ao longo da periferia do comutador, o que corresponde a torcer o comutador com as ligações já feitas, as escovas devem acompanhar tal deslocamento, a fim de estarem sempre diretamente ligadas aos condutores do plano de inversão. É compreensível, portanto, que a posição mecânica das escovas, seja ela qual fôr, representa sempre a posição do máximo aproveitamento das f.e.m. e, por conseguinte, representa a posição do plano de inversão magnética, a que os condutores induzidos estão sujeitos.

7 — Enrolamento induzido multipolar tipo anel

A Fig. 13 indica o enrolamento tipo anel com quatro pólos, 16 condutores ativos, 16 lâminas no comutador e 4 escovas. Examinando-se o

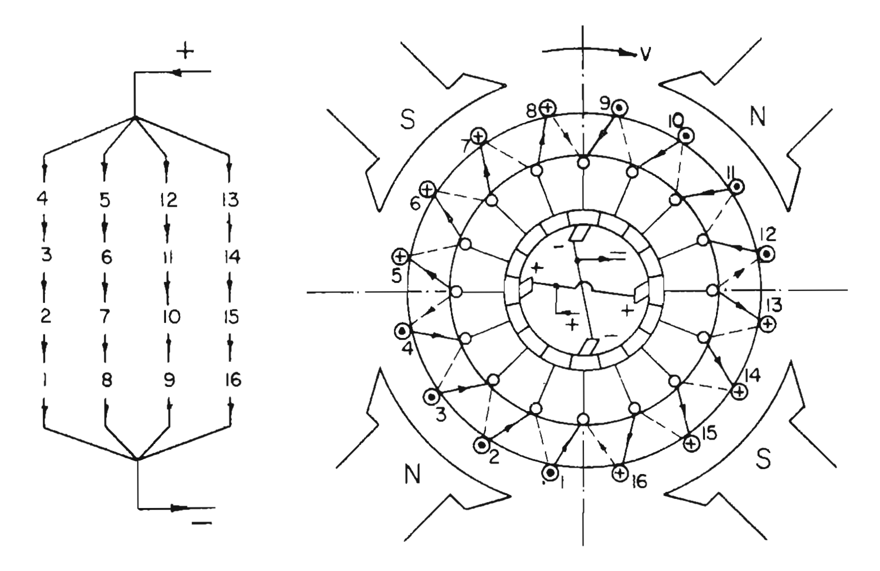


Fig. 13

esquema, é fácil convencer-se de que o número de vias internas é 4, isto é, no enrolamento existem quatro séries distintas de condutores, as quais convergem para as quatro escovas com polaridade alternada. As escovas homônimas são agrupadas para alimentar o circuito utilizador por meio de dois fios.

A diferença de potencial existente nos bornes da máquina é igual à soma das f.e.m. dos condutores de cada via interna, sendo as quatro vias internas iguais entre si.

Se o enrolamento alimentar um circuito utilizador, este absorverá uma corrente igual à soma das quatro correntes que atravessam as vias internas do induzido.

8 — Enrolamento induzido multipolar imbricado ou em paralelo

Um enrolamento deste tipo é o representado na Fig. 14 (a) que se refere a uma máquina com 4 pólos, possuindo 16 condutores induzidos, isto é, 8 espiras. Processando-se a rotação no sentido indicado pela seta *v*, as f.e.m. nos condutores são dirigidas conforme indicado na figura.

Imaginando-se cortar o induzido, por exemplo, entre os condutores 1 e 16 para planificá-lo, o esquema que o representa adquire a forma indicada na Fig. 14 (b).

Iniciando-se o enrolamento no ponto *a* pelo condutor *1* embaixo do pólo Norte e ligando-se este ao condutor *6* embaixo do pólo Sul, para depois efetuar a ligação deste último com o condutor *3* embaixo do pólo Norte, constitui-se uma espira (traçado forte). O enrolamento é convenientemente constituído por 8 espiras idênticas contíguas, ligadas entre si. Ligando-se o condutor *3* com o *8*, o *8* com o *5*, o *5* com o *10* e assim sucessivamente, chega-se a fechar o enrolamento no ponto *a* da partida.

As lâminas do comutador podem ser ligadas ao ponto médio das conexões frontais do induzido, de um lado ou do outro, indiferentemente. Na figura as lâminas estão ligadas às conexões 1-4; 3-6; 5-8; etc.

A ordem das conexões corresponde à indicada na Fig. 14 (c), isto é, partindo-se do ponto *a* ou da lâmina a que este está ligado, percorrendo-se o enrolamento através dos condutores 1; 6; 3; 8, chega-se ao ponto *b* e, portanto, à lâmina a ele ligada.

Entre *a* e *b* existe a diferença de potencial igual à soma das f.e.m. induzidas nos condutores mencionados, dirigida de *b* para *a*.

Prosseguindo-se o enrolamento a partir do ponto *b*, chega-se ao ponto *c*, percorrendo-se os condutores 5; 10; 7; 12, os quais possuem f.e.m. concordes entre si, dirigidas de *b* para *c*.

Como as f.e.m. deste grupo de condutores são iguais e opostas às do primeiro grupo, conclui-se que o ponto *c* está com o mesmo potencial de *a*.

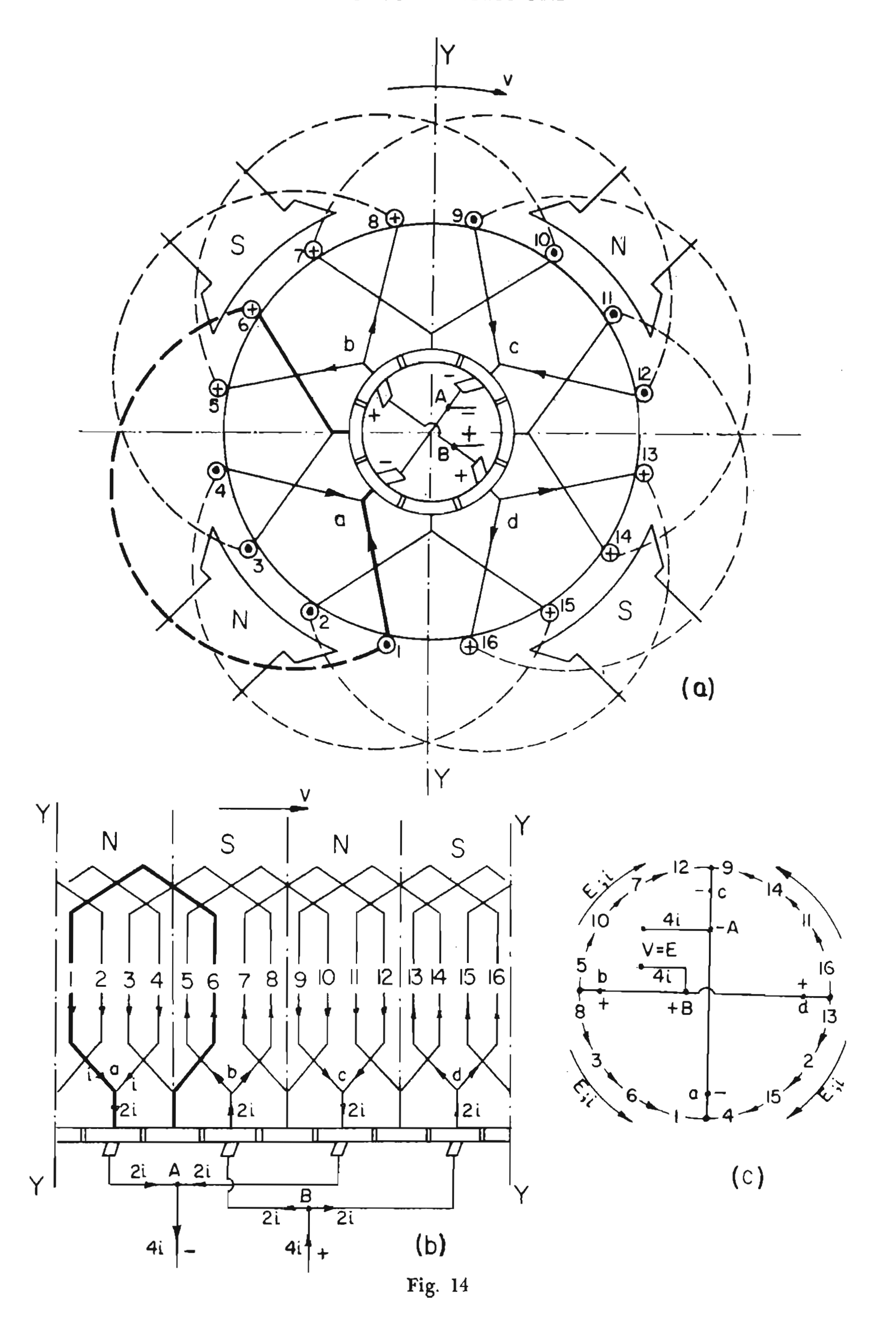


Fig. 14

Prosseguindo-se o enrolamento, partindo-se de *c*, chega-se ao ponto *d*, depois de ter passado pelos condutores 9; 14; 11; 16, cujas f.e.m. são dirigidas de *d* para *c*. Sendo a f.e.m. total deste grupo igual e contrária à precedente, conclui-se que o ponto *d* possui o mesmo potencial que o *b*.

E, por fim, passando-se pelos condutores 13; 2; 15; 4, chega-se ao ponto de partida *a*, fechando-se o enrolamento. As f.e.m. dos condutores deste último grupo são dirigidas de *d* para *a* e possuem valor igual às dos outros 3 grupos anteriormente considerados.

Se o circuito utilizador estiver desligado, no enrolamento fechado não circulará corrente alguma, pois as f.e.m. correspondentes às 4 vias internas do induzido estão duas a duas em oposição.

Os pontos que possuem igual potencial podem ser agrupados entre si, isto é, *b* com *d* e *a* com *c*, a fim de se realizar respectivamente o borne positivo e negativo da máquina. Com estes agrupamentos as 4 vias internas antes examinadas resultam ligadas em paralelo entre si, conforme Fig. 15.

Entre os bornes *A* e *B* da máquina existirá uma diferença de potencial correspondente à f.e.m. de cada via interna e a corrente no circuito utilizador (externo) é igual a 4 vezes a fornecida por cada via interna.

Conforme foi observado, são necessárias 4 escovas sobre o comutador, com polaridade alternadamente positiva e negativa.

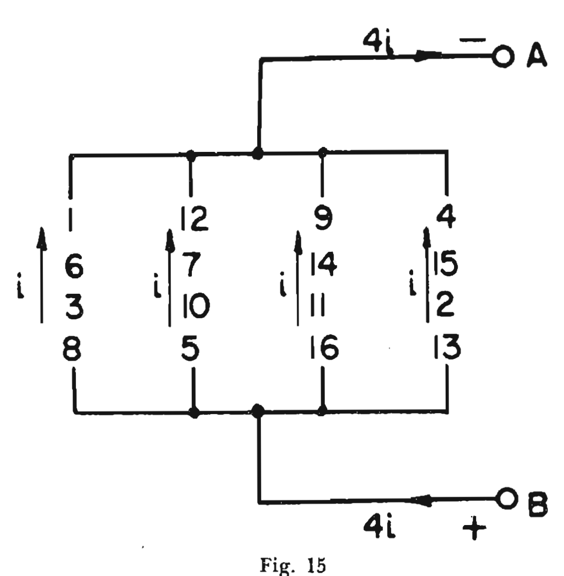


Fig. 15

As escovas homônimas são diretamente agrupadas entre si e o circuito utilizador é ligado aos dois bornes *A* e *B* assim obtidos.

O princípio exposto é válido para as máquinas com qualquer número de pólos, desde que sejam feitas as devidas adaptações.

Em todos os casos, para se efetuar um enrolamento multipolar em paralelo, conforme o considerado, liga-se sempre um condutor situado embaixo de um pólo com um condutor situado embaixo do consecutivo, de nome contrário. Liga-se este último com outro condutor embaixo do primeiro pólo e assim sucessivamente até fechar o enrola-

mento. Opera-se, como praticamente se diz, dando um passo para a frente e outro para trás.

O enrolamento assim realizado resulta constituído por espiras idênticas, contíguas e parcialmente sobrepostas e por esta razão este tipo de enrolamento é denominado também de *imbricado*. A palavra imbricado provém do latim *imbricatu*, que define coisas que se sobrepõem parcialmente, como as telhas de um telhado.

Indicando-se com *R* a resistência elétrica do condutor empregado no enrolamento, a resistência de cada via interna resulta R/4, enquanto a resistência total dos 4 circuitos em paralelo, medível entre as escovas, é R/16.

Em geral se *2a* é o número das vias internas do induzido e *R* a resistência do fio empregado no mesmo, a resistência medível entre as escovas resulta

$$R_i = \frac{R}{(2a)^2}$$

9 — Características do enrolamento imbricado ou em paralelo

O enrolamento imbricado, seja qual for o número dos pólos da máquina, é caracterizado pelos seguintes pontos:

1 — O enrolamento é executado ligando-se um condutor embaixo de um pólo com um condutor embaixo de um dos pólos adjacentes, para depois ligar este último com outro condutor embaixo do primeiro pólo, usando-se o processo de dar um passo para a frente e outro para trás. As espiras do enrolamento assim realizadas se sobrepõem parcialmente, como as telhas de um telhado, de onde o enrolamento recebe o nome de imbricado.

2 — O enrolamento possui tantas vias internas quantos forem os pólos da máquina. Cada via interna possui um número de condutores obtido dividindo-se o número total dos condutores do enrolamento pelo número dos pólos da máquina. Os condutores de cada via interna estão distribuídos embaixo de dois pólos adjacentes. As vias internas do enrolamento são agrupadas em paralelo por meio da ligação das escovas.

3 — Partindo-se de uma lâmina do comutador e seguindo-se o enrolamento, chega-se à lâmina adjacente depois de ter percorrido uma só espira, formada por um condutor embaixo de um pólo e o outro embaixo do pólo de nome contrário que o segue.

4 — Sobre o comutador devem apoiar-se tantas escovas quantos forem os pólos da máquina. Ditas escovas são eqüidistantes entre si, sucedendo-se com polaridade alternadamente positiva e negativa. As escovas do mesmo nome são todas agrupadas entre si para formar

respectivamente o borne positivo e o borne negativo, aos quais conecta-se o circuito utilizador.

5 — A diferença de potencial existente entre os bornes, positivo e negativo, corresponde, portanto, à que se gera em cada uma das vias internas.

6 — A corrente que o circuito utilizador absorve é fornecida em partes iguais pelas vias internas agrupadas em paralelo. A corrente que circula nos condutores do induzido corresponde à do circuito utilizador dividida pelo número dos pólos da máquina.

7 — Pelas características mencionadas nos itens 5 e 6 resulta que o enrolamento imbricado ou paralelo, com muitos pólos, é conveniente para máquinas com tensões relativamente baixas e correntes de elevada intensidade.

10 — Enrolamento multipolar ondulado ou em série

Este tipo de enrolamento é executado conforme o processo exposto nas Figs. 16 (a), (b) e (c), relativo ao enrolamento de uma máquina tetrapolar, com 22 condutores induzidos.

A execução do enrolamento ondulado é caracterizada pelo fato de que a ligação dos condutores do induzido se realiza dando-se sempre passos para a frente, isto é, partindo-se do condutor *1* embaixo do pólo Norte chega-se ao *6,* embaixo do pólo Sul, deste condutor; com outro passo para a frente chega-se ao *13,* embaixo do pólo seguinte, e assim sucessivamente. Após dar várias voltas ao redor do induzido, fecha-se o enrolamento ao se chegar ao condutor *1.*

Imaginando-se cortar o induzido na zona compreendida entre os condutores *1* e *22* para planificá-lo, o esquema que o representa está indicado na Fig. 16 (b). Neste esquema as conexões adquirem a forma de ondas, o que dá o nome de ondulado ao tipo de enrolamento.

As ligações ao comutador são feitas no ponto central das conexões anteriores.

Observando-se os sentidos das f.e.m. nos condutores, nota-se que na conexão 7-22 as correntes se afastam da lâmina *A* e, por isso, sobre esta lâmina se apóia a escova positiva. Na conexão 16-1 as f.e.m. convergem para a lâmina *B* e por isso sobre a mesma se apóia a escova negativa.

O enrolamento é constituído por duas vias internas, cada uma das quais possui a metade dos condutores induzidos, ligados em série. Seguindo-se o enrolamento, a partir da escova negativa, chega-se à escova positiva após ter percorrido os condutores de cada via interna, conforme indica a Fig. 16 (c).

Para que o enrolamento fosse dividido em duas vias internas iguais, a escova positiva deveria estar ligada à conexão 17-22, o que é impossível, pois esta conexão se encontra do outro lado do induzido, e por isso

a escova negativa está ligada à conexão 22-7. Esta alteração na simetria do enrolamento não afeta o funcionamento da máquina, pois o condutor 22 interposto está próximo da zona de inversão e por isso sua f.e.m. é quase nula.

Seja qual for o número de pólos da máquina, a diferença de potencial disponível entre as escovas corresponde sempre à gerada em metade dos condutores induzidos, e a corrente no circuito utilizador é igual à soma das fornecidas pelas duas vias internas.

Se o número das vias internas é sempre 2, por qualquer número de pólos da máquina, a resistência elétrica do enrolamento, medível entre as escovas, resulta

$$R_1 = \frac{R}{2^2} = \frac{R}{4}$$

onde *R* é a resistência do fio antes de ter sido enrolado.

Vale a pena salientar que nos enrolamentos ondulados, embora se necessitem somente duas escovas, seja qual for o número de pólos da máquina, é possível, se necessário, usarem-se tantas escovas quantos forem os pólos da máquina. No esquema da Fig. 16, por exemplo, é possível aplicar-se uma segunda escova positiva na conexão 12-19 e uma segunda escova negativa na conexão 6-13. As escovas do mesmo nome devem ser agrupadas entre si. As escovas homônimas colocadas como acima foi explicado encontram-se eletricamente próximas, embora estejam angularmente afastadas, pois entre elas intercede unicamente uma espira. Nesta espira a f.e.m. é praticamente nula, pois seus condutores se encontram próximos da zona de inversão. O enrolamento não altera suas características com o aumento do número das escovas.

O aumento do número das escovas é necessário nas máquinas com corrente elevada, a fim de se evitarem escovas muito grandes, que obrigam o uso de comutador muito comprido e, por conseguinte, de custo elevado.

11 — Características do enrolamento ondulado ou em série

O enrolamento ondulado ou em série, seja qual for o número de pólos da máquina, é caracterizado pelos seguintes pontos:

1 — O enrolamento é executado ligando-se um condutor embaixo de um pólo com um condutor embaixo do pólo consecutivo, para depois se ligar esse último a um condutor embaixo do outro pólo consecutivo, usando-se o processo de dar os sucessivos passos sempre para frente. As espiras do enrolamento assim realizado têm forma de onda, o que dá ao enrolamento o nome de ondulado.

2 — O enrolamento possui sempre duas vias internas, seja qual for o número dos pólos da máquina. Cada via interna possui a metade dos condutores induzidos.

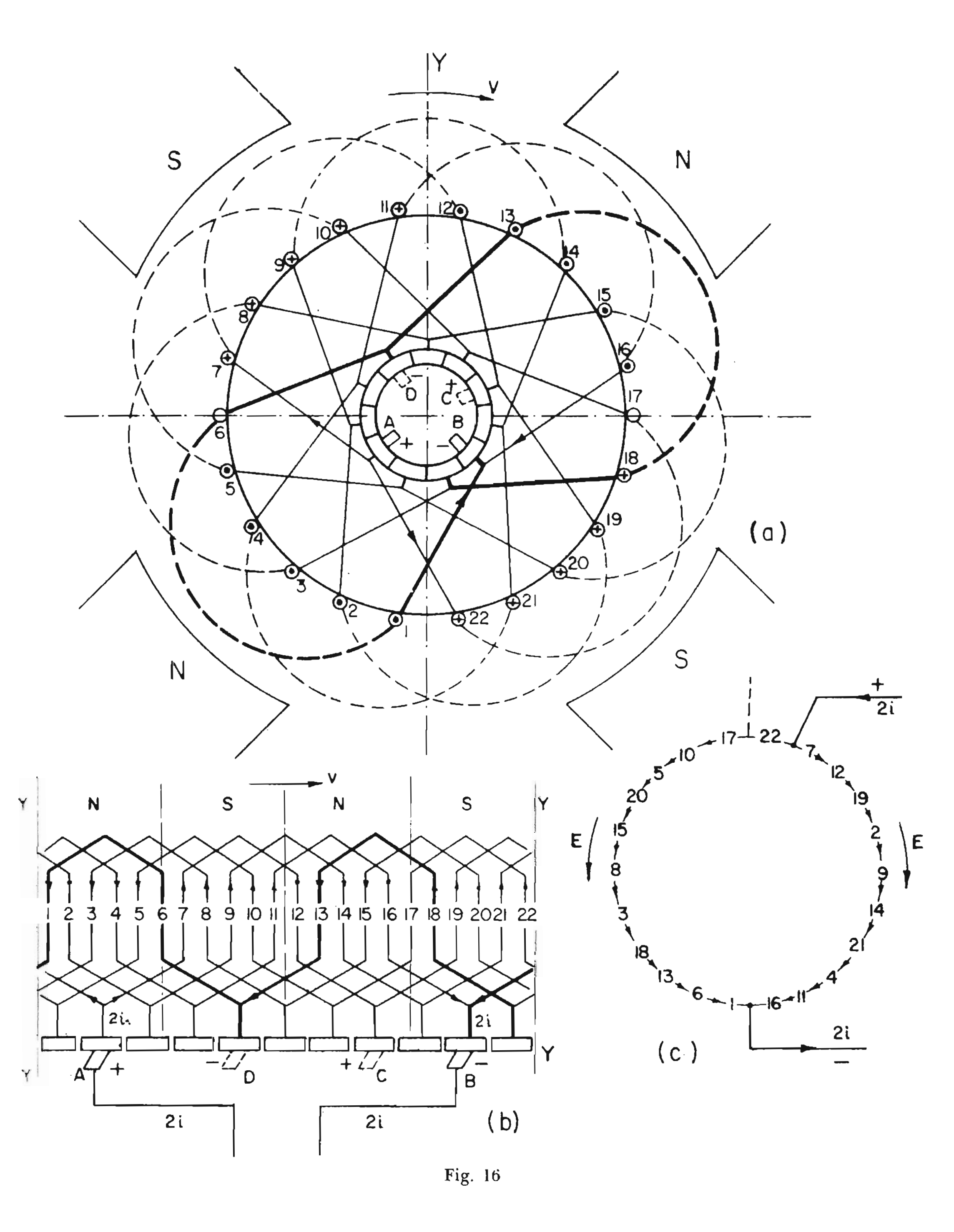


Fig. 16

3 — Partindo-se de uma lâmina do comutador, chega-se à lâmina adjacente somente depois de se ter dado uma volta ao redor do induzido, percorrendo um condutor por cada pólo.

4 — Seja qual for o número de pólos, são suficientes duas escovas: uma positiva e outra negativa, as quais se apóiam sobre o comutador em correspondência com dois pólos de nome contrário. É possível, entretanto, usar tantas escovas quantos forem os pólos da máquina, ficando elas, neste caso, eqüidistantes, com polaridade alternada positiva e negativa. Neste último caso as escovas do mesmo nome devem ser agrupadas entre si para formar, respectivamente, o borne positivo e o borne negativo, aos quais se conecta o circuito utilizador.

5 — A diferença de potencial disponível entre as escovas corresponde à que se gera na metade dos condutores induzidos.

6 — A corrente absorvida pelo circuito utilizador é fornecida em partes iguais pelas duas vias internas, agrupadas em paralelo; o valor da sua intensidade, portanto, é o dobro do valor da corrente que percorre os condutores do enrolamento.

7 — Pelas características mencionadas nos itens 5 e 6, resulta que o enrolamento ondulado ou em série é conveniente para máquinas que devem produzir tensões elevadas e correntes de baixa intensidade.

12 — Disposição dos enrolamentos sobre o induzido

A colocação dos condutores sobre a periferia da armadura rotórica não é possível, pois seria difícil amarrá-los de forma a assegurar-lhes a resistência necessária para resistir ao efeito da força centrífuga. Além disso, a presença dos condutores na periferia do induzido obrigaria a máquina a possuir entreferro muito grande, com excessivo gasto de potência elétrica necessária à excitação da mesma.

Os fatos expostos tornam evidente a conveniência de se colocarem os enrolamentos induzidos em ranhuras apropriadas existentes ao longo da periferia da armadura do induzido.

A obtenção das ranhuras do induzido não apresenta grandes dificuldades, pois os mesmos são constituídos por pacotes de lâminas. Estampando as lâminas com perfil conveniente, obtêm-se na montagem da armadura as ranhuras desejadas.

A Fig. 17 (a) mostra o tipo de ranhura semi-aberta, usada nas máquinas de pequena potência, que empregam condutores redondos, com diâmetro de até 2 mm. A Fig. 17 (b) mostra o tipo de ranhura aberta, usada nas máquinas de pequena e média potência, que utilizam condutores retangulares. O motor de arranco do automóvel usa este tipo de ra-

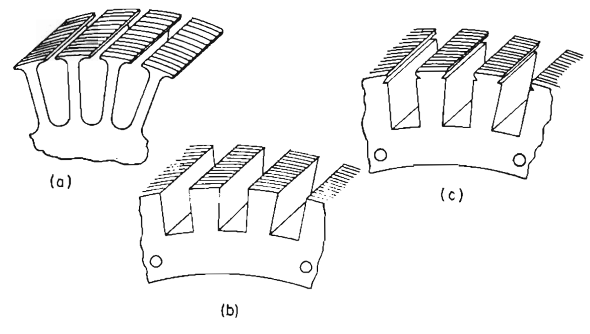


Fig. 17

nhura. A Fig. 17 (c) mostra o tipo de ranhura aberta que permite o fechamento com tampa de madeira, usada nas máquinas de grande potência.

Em cada ranhura são colocados os condutores ativos do enrolamento, divididos em duas camadas, a superior e a inferior, conforme mostra a Fig. 18.

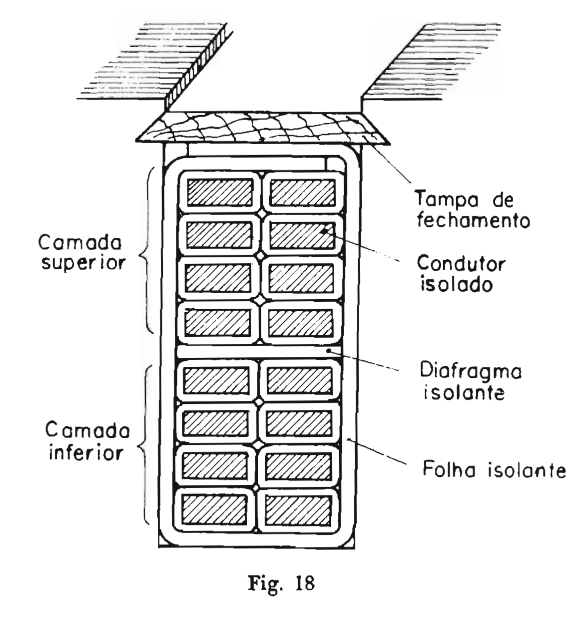


Fig. 18

Entre a camada superior e a inferior há um diafragma de material isolante, enquanto o conjunto dos condutores é isolado da ranhura por uma folha de material isolante, que envolve totalmente os lados da bobina.

O material isolante empregado depende da tensão nominal da máquina e pode ser papel, fibra, tela, micartite ou micanite. A tampa que fecha a ranhura pode ser de fibra ou de madeira.

13 — Formato das bobinas

Examinando as Figs. 19 (a) e (b), que representam uma parte do enrolamento respectivamente imbricado e ondulado, pode-se facilmente concluir que cada um deles pode ser executado por meio de tantos *elemen-*

tos idênticos contíguos. Define-se elemento o conjunto das espiras que é necessário percorrer para passar de uma lâmina do comutador, por exemplo (a), para a sucessiva (b).

Na prática, os elementos são fabricados por meio de moldes especiais para em seguida serem montados sobre a armadura. Após a montagem de todos os elementos, unir-se-á o fim (f) de um elemento com o princípio (p) do elemento seguinte. A união é feita soldando-se estes terminais às lâminas do comutador.

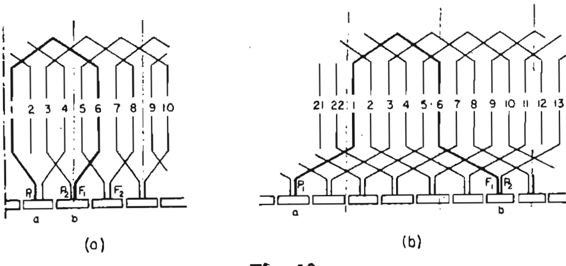


Fig. 19

Construtivamente o enrolamento imbricado e o ondulado diferem pela forma característica de seus elementos e, portanto, de suas bobinas. No enrolamento imbricado o elemento é ligado a duas lâminas adjacentes do comutador e tem por isso seus extremos *P* e *F* próximos um do outro. No enrolamento ondulado, pelo contrário, o elemento é ligado a duas lâminas afastadas uma da outra e por isso os extremos *P* e *F* estão bifurcados.

Nos esquemas até agora examinados, cada elemento do enrolamento era formado por dois condutores ativos e por isso o número das lâminas do comutador era sempre a metade do número dos condutores induzidos. Este tipo de enrolamento, em geral executado com condutores retangulares de grande seção, é chamado enrolamento de barras, sendo empregado nas máquinas de tensão reduzida e elevada intensidade de corrente. O aspecto dos elementos de barra está indicado nas Figs. 20 (a) e (b), que representam respectivamente o elemento imbricado e o elemento ondulado.

Para máquinas com tensão elevada e intensidade de corrente reduzida, necessita-se de muitos condutores ativos de pequena seção; recor-

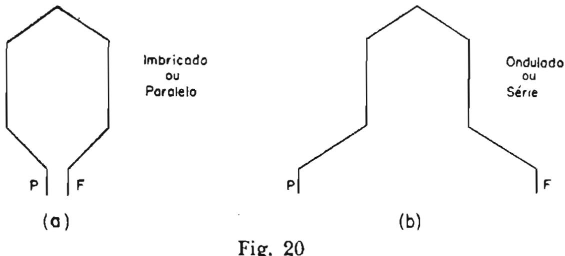


Fig. 20

re-se, então, à construção com bobina, cujos elementos estão representados nas Figs. 21 (a) e (b), respectivamente para o enrolamento imbricado e ondulado.

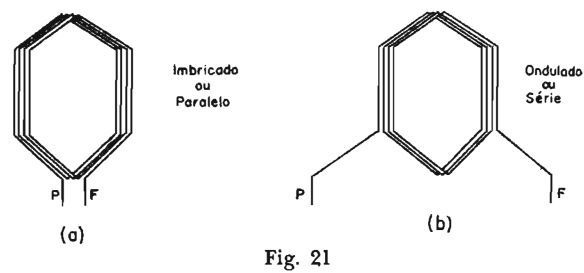


Fig. 21

As bobinas ou os elementos são amarrados com cadarço de algodão a fim de formarem um conjunto rígido e bem isolado, do qual saem os terminais *P* e *F* para ligação com os demais elementos e o comutador.

Neste tipo de enrolamento o comutador tem sempre tantas lâminas quantos são os elementos do enrolamento, embora estes últimos sejam formados por um número qualquer de espiras agrupadas em série.

Das Figs. 19 (a) e (b) resulta que as conexões frontais dos enrolamentos se cruzam e, por isso, para que tais conexões possam ser executadas sem problemas, os elementos ou os lados de bobinas são dispostos nas ranhuras em duas camadas sobrepostas. Os elementos devem ser montados de forma que tenham um lado na camada superior de uma ranhura e o outro na camada inferior de outra ranhura. Nestas condições todos os princípios dos elementos, por exemplo, resultarão na camada inferior, enquanto os fins resultarão na camada superior. Todos os fins,

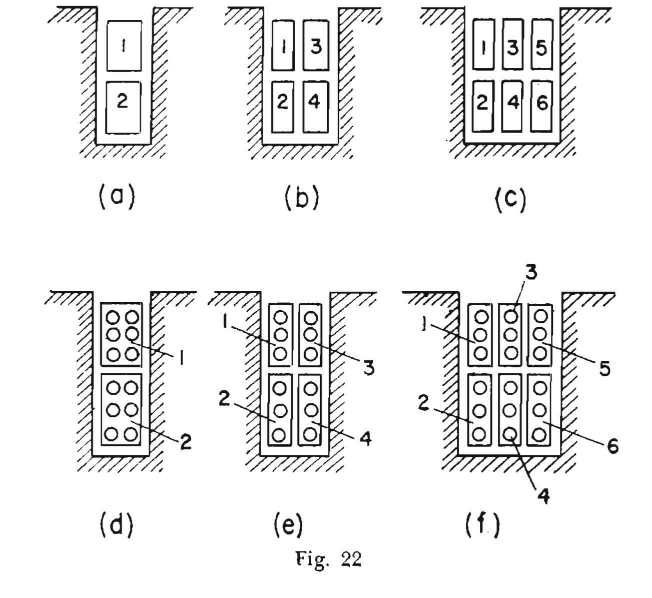


Fig. 22

ao sair da ranhura, podem ser curvados para a direita ou para a esquerda sem cruzar com nenhum princípio, pois êstes se encontram em nível diferente.

Em cada camada podem-se dispor 1,2,3 ou mais lados de elementos, isto é, 2,4,6 ou mais lados de elementos por ranhura, conforme a Fig. 22. As Figs. (a), (b) e (c) são relativas a enrolamentos de barras, com 2,4,6 lados de elementos por ranhura.

As Figs. (d), (e) e (f) são relativas ao enrolamento de bobinas com 2, 4 e 6 lados de elemento por ranhura.

A numeração dos lados de elementos é feita segundo a disposição indicada nas figuras, isto é, obedece à norma de se disporem os de número par numa camada e os de número ímpar na outra. Cada elemento resulta então constituído por um lado ímpar e outro par.

Nos enrolamentos de barra a disposição é feita conforme a Fig. 23 (a), sendo os terminais soldados conforme as Figs. 23 (b) e (c), respectivamente na parte posterior do induzido e do lado do comutador.

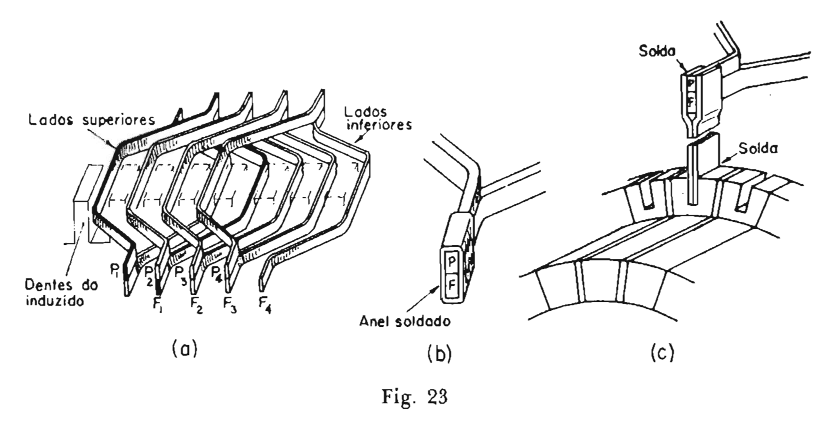


Fig. 23

No enrolamento de bobina o elemento é constituído e montado conforme mostra a Fig. 24.

Quando uma bobina contém mais de um elemento, adquire a forma indicada nas Figs. 25 (a) e (b), que representam respectivamente uma bobina com várias seções para enrolamento imbricado e para enrolamento ondulado.

14 — Passos dos enrolamentos

Define-se como *passo* a distância que separa dois elementos, sejam eles condutores, lados de elementos, ranhuras ou lâminas que devem ser ligados entre si. Esta distância exprime-se com um número que, somado ao número de ordem do elemento considerado, fornece o número de ordem do elemento com o qual deve ser ligado. Assim sendo, se o condutor n.º 1 deve ser ligado ao condutor n.º 6, o passo é igual a 5,

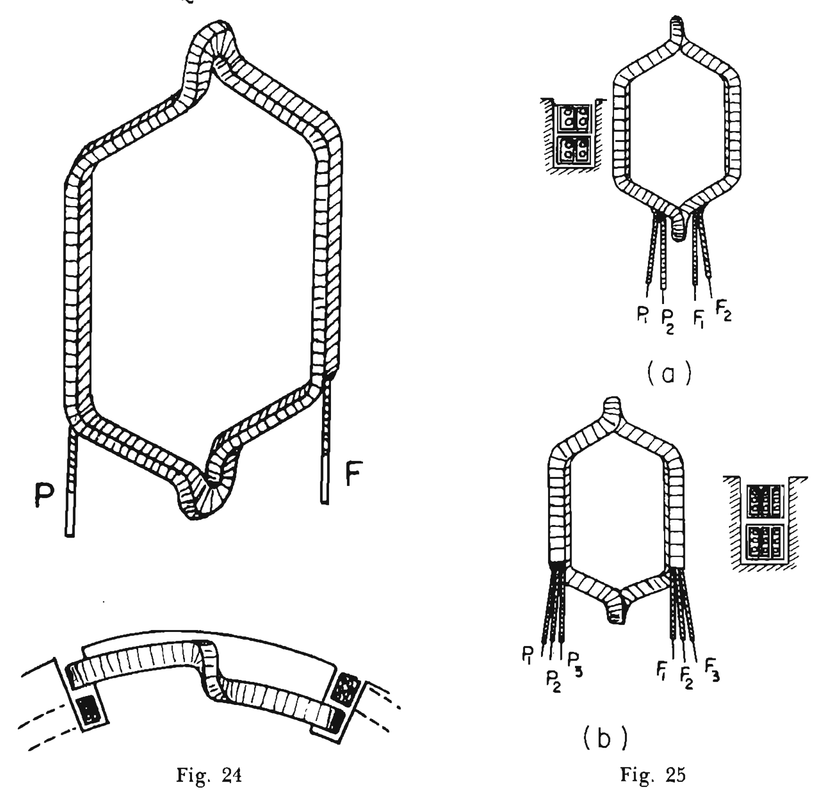


Fig. 24

Fig. 25

pois 1 + 5 = 6. No caso de uma bobina ter seus lados colocados nas ranhuras 1 e 12, o passo às ranhuras será 11.

No enrolamento tipo tambor, os passos a serem considerados, representados nas Figs. 26 (a) e (b), são:

1 — *Passo polar* — (τ) — Mede a distância entre dois eixos polares, sendo expresso em geral em número de ranhuras ou em lados de elementos.

2 — *Passo posterior* — (Y_1) — Representa a amplitude dos elementos e das bobinas, representando as ligações dos elementos do lado oposto ao comutador.

3 — *Passo anterior* — (Y_2) — Representa a distância entre os elementos que devem ser ligados entre si na parte frontal do coletor.

4 — *Passo resultante* — (Y) — É definido pela soma (enrolamento ondulado) ou pela diferença (enrolamento imbricado) dos passos posterior (Y_1) e anterior (Y_2).

5 — *Passo às ranhuras* — (Y_n) — Determina em quais ranhuras estão colocados os lados de um elemento; seu valor é fornecido por

$$Y_n = \frac{Y_1 - 1}{m}$$

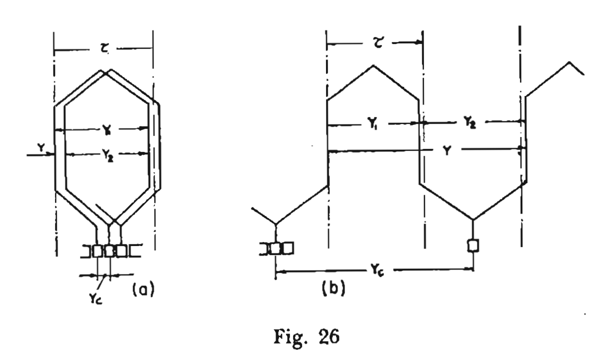


Fig. 26

onde m representa o número dos lados de elementos por ranhura.

6 — *Passo ao comutador* — (Y_c) — É expresso em número de lâminas e representa a distância que separa o princípio e o fim de um elemento; seu valor é sempre a metade do passo resultante (Y), isto é:

$$Y_c = \frac{Y}{2}$$

15 — Cálculo dos passos do enrolamento imbricado

O enrolamento imbricado ou paralelo é executado, conforme foi visto no item 8, com um passo para frente e outro para trás. Requer, portanto, que os dois passos Y_1 e Y_2 sejam diferentes entre si, pois do contrário o elemento seria fechado em curto-circuito, não permitindo a execução do enrolamento.

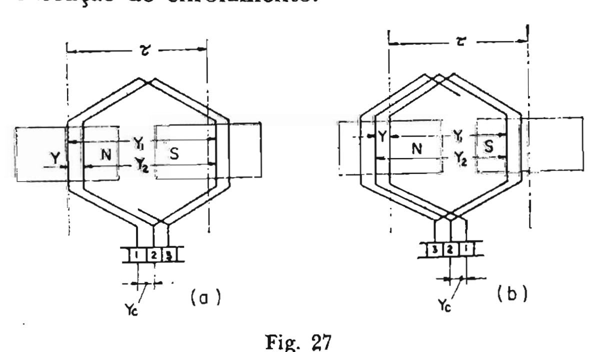


Fig. 27

A Fig. 27 (a) mostra um enrolamento executado com o passo Y_1 maior que Y_2. O enrolamento progride para a direita, por isso é chamado de *enrolamento progressivo*.

A Fig. 27 (b) mostra um enrolamento com o passo Y_1 menor que Y_2, por isso progride para a esquerda, sendo chamado de *enrolamento regressivo*.

O passo resultante é sempre fornecido pela diferença $Y_1 - Y_2$, resultando igual a (+ 2) para o enrolamento progressivo e (— 2) para o enro-

lamento regressivo. Conseqüentemente o passo ao comutador resulta (+ 1) para o enrolamento progressivo e (− 1) para o regressivo.

O melhor aproveitamento das f.e.m. induzidas nos condutores obtém-se quando os passos Y_1 e Y_2 são muito próximos do passo polar $\tau = F/2p$, onde F representa o número de condutores ativos no caso de enrolamento de barras, ou dos lados de elementos induzidos, no caso de enrolamentos de bobinas, e $2p$ o número dos pólos da máquina.

Mesmo que o enrolamento possua um número ímpar de elementos, o número F dos lados de elementos é sempre par. Ao se percorrer o enrolamento, para se utilizarem todos os lados de elementos, é preciso que um lado de elemento ímpar esteja ligado a um lado de elemento par, este último com um lado de elemento ímpar e assim sucessivamente. O fato mencionado somente é possível se Y_1 e Y_2 forem ímpares.

Se a relação $\tau = F/2p$ for par, os valores Y_1 e Y_2 para serem ímpares e muito próximos de τ deverão diferir deste a menor quantidade possível, isto é, 1; assim sendo, no caso de enrolamento progressivo:

$$Y_1 = \frac{F}{2p} + 1 \quad e \quad Y_2 = \frac{F}{2p} - 1; \text{ resultando } Y_1 > Y_2.$$

No caso do enrolamento regressivo resulta:

$$Y_1 = \frac{F}{2p} - 1 \quad e \quad Y_2 = \frac{F}{2p} + 1; \text{ resultando } Y_1 < Y_2.$$

Se por acaso a relação $\tau = F/2$ não resulta um número inteiro, ou resulta ímpar, subtrai-se ao número dos lados de elementos F o menor número b de forma que resulte:

$$\frac{F - b}{2p} = \text{número inteiro par}$$

Para o caso mencionado, as fórmulas antes escritas transformam-se nas seguintes:

$$Y_1 = \frac{F - b}{2p} \pm 1; \quad Y_2 = \frac{F - b}{2p} \mp 1$$

$$Y = Y_1 - Y_2 = \pm 2; \qquad Y_c = \frac{Y}{2} = \pm 1$$

resultando para o enrolamento progressivo $Y_1 > Y_2$ e para o regressivo $Y_1 < Y_2$.

Vale a pena salientar que no enrolamento regressivo o tamanho dos elementos resulta menor que o dos elementos do enrolamento progres-

sivo, pois no primeiro caso $Y_1 < \tau$. O menor tamanho dos elementos traz como conseqüência menor comprimento de fio enrolado, menor volume das cabeças do induzido, menor resistência elétrica do enrolamento e, portanto, menores quedas de tensão e menores perdas por efeito joule. Por esta razão o enrolamento regressivo deve ser preferido ao progressivo.

16 – Exercícios de aplicação sobre enrolamentos imbricados

Exercício 1

Calcular os passos Y_1;Y_2;Y;Y_c e Y_n do enrolamento imbricado regressivo bipolar com 16 ranhuras e 16 lâminas no comutador.

Solução:

Se o comutador possui 16 lâminas, o enrolamento possuirá 16 elementos e por conseguinte 32 lados de elementos, isto é, F = 32. Em cada ranhura resultam 2 lados de elementos, dispostos em duas camadas. As características do enrolamento são:

$$2p = 2 \ ; \ F = 32$$

Passo posterior:

$$Y_1 = \frac{F}{2p} - 1 = \frac{32}{2} - 1 = 15 \text{ lados de elemento.}$$

Passo anterior:

$$Y_2 = \frac{F}{2p} + 1 = \frac{32}{2} + 1 = 17 \text{ lados de elemento.}$$

Passo resultante:

$$Y = Y_1 - Y_2 = 15 - 17 = -2 \text{ lados de elemento.}$$

Passo ao comutador:

$$Y_c = \frac{Y}{2} = \frac{-2}{2} = -1 \text{ lâmina.}$$

Passo às ranhuras

$$Y_n = \frac{Y_1 - 1}{m} = \frac{15 - 1}{2} = 7 \text{ ranhuras.}$$

O primeiro elemento terá um lado na ranhura 1 e o outro na ranhura 8. A Fig. 28 mostra o esquema deste enrolamento.

Numerando os lados de elemento, colocando por exemplo os ímpares na camada superior e os pares na camada inferior, pode-se constatar que os lados do primeiro elemento têm os números 1 e 16, o que corresponde ao passo posterior $Y_1 = 15$.

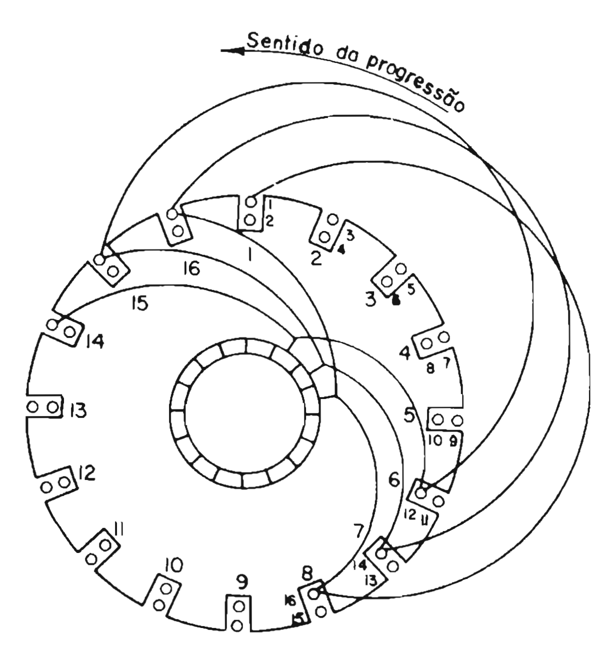


Fig. 28

Exercício 2

Calcular os passos do enrolamento precedente, executado como progressivo.

Solução:

$$Y_1 = \frac{F}{2p} + 1 = \frac{32}{2} + 1 = 17 \; ; \; Y_2 = \frac{F}{2p} - 1 = \frac{32}{2} - 1 = 15$$

$$Y = Y_1 - Y_2 = 17 - 15 = 2 \; ; \; Y_c = \frac{2}{2} = 1$$

$$Y_n = \frac{Y_1 - 1}{m} = \frac{17 - 1}{2} = 8$$

O primeiro elemento terá um lado na ranhura 1 e outro na ranhura 9, resultando mais comprido que no caso anterior, acarretando maiores perdas e apresentando maiores dificuldades de montagem. A Fig. 29 mostra o esquema deste enrolamento.

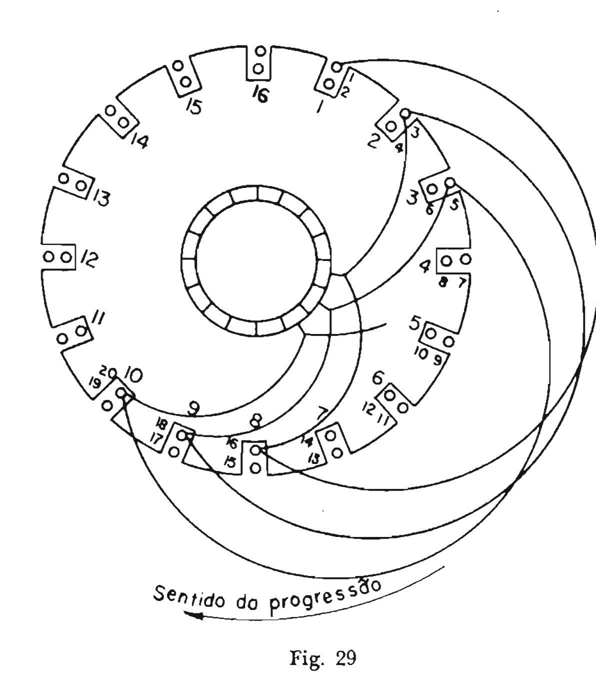


Fig. 29

Observações — Em muitos casos, especialmente nos induzidos bipolares, onde os lados de elemento resultam quase diametralmente opostos, conforme Figs. 28 e 29, a fim de facilitar a montagem dos elementos no induzido prefere-se reduzir o tamanho dos mesmos, encurtando de uma ranhura o passo às ranhuras. Assim sendo, o enrolamento da Fig. 28 poderá ser executado com as seguintes características:

$$Y_n = 6;\ Y_1 = mY_n + 1 = 2 \cdot 6 + 1 = 13.$$

Como o enrolamento é regressivo resulta

$$Y_2 = Y_2 + 2 = 13 + 2 = 15.$$

O primeiro elemento seria montado nas ranhuras 1 e 7.

Exercício 3

Calcular os passos do enrolamento imbricado tetrapolar regressivo com 17 ranhuras e 17 lâminas no comutador.

Solução:

Se as lâminas do comutador são 17, os lados de elementos resultam $F = 17 \times 2 = 34$, isto é, 2 lados de elementos por ranhura.

A relação $\dfrac{F}{2p} = \dfrac{34}{4}$ não fornece um número inteiro. O menor

número a ser subtraído de F, para que a relação forneça um número par, é 2, pois

$$\frac{F - b}{2p} = \frac{34 - 2}{4} = 8.$$

As demais grandezas resultam:

$$Y_1 = \frac{F - b}{2p} - 1 = 8 - 1 = 7; \ Y_2 = \frac{F - b}{2p} + 1 = 8 + 1 = 9$$

$$Y = Y_1 - Y_2 = 7 - 9 = -2; \ Y_c = \frac{Y}{2} = \frac{-2}{2} = -1$$

$$Y_n = \frac{Y_1 - 1}{m} = \frac{7 - 1}{2} = 3$$

Observações — Em certos casos pode ocorrer que o passo Y_1, calculado pelas fórmulas antes escritas, satisfaça a exigência de ser número ímpar, mas não permita a realização do enrolamento, pois se o mesmo deverá ser feito com bobinas de tamanho diferente, resulta impossível sua execução mecânica. Veja-se, por exemplo, o caso do enrolamento, cujos dados são:

— Enrolamento tetrapolar, progressivo, com 22 ranhuras e 44 lâminas no comutador.

Se o comutador possui 44 lâminas, o enrolamento possui 44 elementos e portanto $F = 88$ lados de elementos, resultando 4 lados de elementos por ranhura.

$$Y_1 = \frac{F}{2p} + 1 = \frac{88}{4} + 1 = 23; \ Y_2 = 21$$

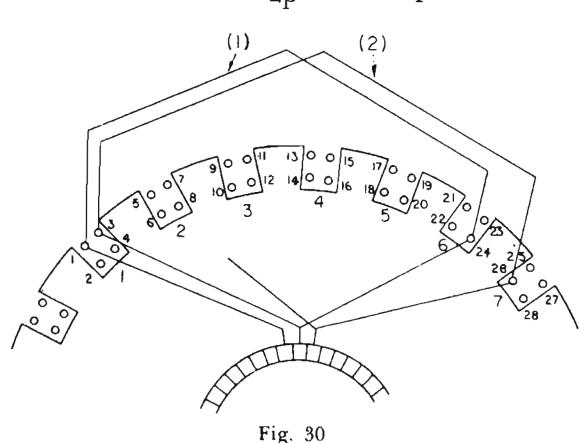


Fig. 30

A Fig. 30 mostra claramente que o elemento (2) é de comprimento diferente do elemento (1), pois ambos possuem um lado na ranhura 1, e o outro lado, respectivamente, nas ranhuras 6 e 7.

A verificação de possibilidade do enrolamento não necessita ser feita com processo gráfico

conforme indica a Fig. 30, pois a mesma é laboriosa. Para tanto é suficiente calcular o passo às ranhuras, logo depois de ter calculado o passo posterior Y_1. Se o passo às ranhuras resultar fracionário, o enrolamento é impossível. No caso citado

$$Y_n = \frac{Y_1 - 1}{m} = \frac{23 - 1}{4} = \frac{22}{4} = 5{,}5$$

o que prova que o enrolamento é impossível.

O enrolamento deverá portanto ser executado com um passo posterior diferente, por exemplo

$$Y_1 = 21 \text{ de onde resulta } Y_n = \frac{Y_1 - 1}{m} = \frac{21 - 1}{4} = 5$$

resultando possível a execução do enrolamento.

Os passos do enrolamento mencionado deverão ser os seguintes:

$$Y_1 = 21; \; Y_2 = 19; \; Y_n = 5; \; Y = 2; \; Y_c = 1$$

Vale a pena salientar que a relação

$$Y_n = \frac{Y_1 - 1}{m}$$

fornece sempre um número inteiro para $m = 2$, isto é, para os enrolamentos executados com dois lados de elementos por ranhura.

17 — Enrolamentos imbricados múltiplos

Os enrolamentos imbricados simples possuem tantas vias internas quantos são os pólos da máquina. Assim sendo, se a máquina for tetrapolar, o número das vias internas será 4, se a máquina for hexapolar o número das vias internas será 6 e assim sucessivamente.

É possível entretanto construir enrolamentos imbricados que possuem um número de vias internas múltiplo do número dos pólos da máquina. Tais enrolamentos possuem dois ou mais circuitos distintos, que são agrupados em paralelo pelas escovas, que neste caso devem ter suficiente largura para poder cobrir um número de lâminas igual, pelo menos, ao número dos circuitos paralelos.

Por exemplo: num induzido de 4 pólos é possível executar o enrolamento com $2a = 8$ vias internas pertencentes a dois circuitos distintos, cada qual com 4 vias internas. Estes dois circuitos são agrupados em paralelo pelas escovas cuja largura deve ser suficiente para cobrir completamente pelo menos duas lâminas.

O enrolamento múltiplo diferencia-se do simples pelo fato de serem os seus passos totais diferentes, isto é,

$$\text{no enrolamento simples} \quad Y = \pm 2$$

$$\text{no enrolamento múltiplo} \quad Y = \pm \frac{2a}{p},$$

devendo ser sempre par.

Nesta última expressão, *2a* representa o número das vias internas totais e *p* a metade do número dos pólos, ou seja o número de pares de pólos.

O passo posterior Y_1 do enrolamento múltiplo é calculado com as mesmas fórmulas do enrolamento simples, isto é:

$$Y_1 = \frac{F}{2p} \pm 1 \text{ ou } Y_1 = \frac{F - b}{2p} \pm 1$$

O passo anterior Y_2 é fornecido pela diferença

$$Y_2 = Y_1 \pm Y$$

O número das vias internas do enrolamento múltiplo é representado pelo divisor comum das expressões F/2 e Y/2, isto é, entre o número dos elementos e a metade do passo total.

Exemplo: — Calcular os passos de um enrolamento imbricado múltiplo, tetrapolar regressivo, com dois circuitos, sendo F = 40 e 20 o número de ranhuras. F = 40; 2p = 4; 2a = 8; m = 2

Solução:

O passo posterior resulta:

$$Y_1 = \frac{F}{2p} - 1 = \frac{40}{4} - 1 = 9$$

$$Y_n = \frac{Y_1 - 1}{m} = \frac{9 - 1}{2} = 4. \text{ (O enrolamento é possível.)}$$

$$Y = \frac{2a}{p} = \frac{8}{2} = 4$$

$$Y_2 = Y_1 + Y = 9 + 4 = 13$$

$$\text{As relações: } \frac{F}{2} = \frac{40}{2} = 20 \text{ e } \frac{Y}{2} = \frac{4}{2} = 2$$

admitem o divisor comum 2, o que corresponde ao fato do induzido possuir dois circuitos distintos.

18 — Conseqüências da modificação de um enrolamento regressivo para progressivo e vice-versa

Conforme foi observado no parágrafo 15, enquanto o enrolamento progressivo desenvolve-se para a direita, o enrolamento regressivo desenvolve-se para a esquerda. Assim sendo, se um enrolamento progressivo for desfeito e substituído por um regressivo, inverte-se a polaridade do mesmo, pois suas bobinas, em lugar de se desenvolverem embaixo de um pólo norte, por exemplo, o farão embaixo de um pólo sul adjacente.

Pelo exposto, é evidente que ao ser desfeito o enrolamento de um induzido, deverá ser observado, além das demais características, também o tipo de enrolamento, a fim de ser refeito da mesma maneira. A troca do tipo do enrolamento acarreta a inversão da polaridade da máquina, em se tratando de dínamo, ou a inversão da rotação, quando se tratar de motor.

19 — Conexões eqüipotenciais

A execução imperfeita do circuito magnético ou a excentricidade do induzido produzem, às vezes, dissimetrias consideráveis na distribuição dos fluxos magnéticos das máquinas elétricas. Esta dissimetria se traduz no desequilíbrio das f.e.m. geradas nas diferentes vias internas do enrolamento, o que provoca a circulação de correntes internas no induzido.

Nas máquinas multipolares, com enrolamento induzido simples ou múltiplo, a ligação em paralelo das vias internas é feita por meio das escovas. O desequilíbrio das f.e.m. provoca, neste caso, uma corrente de compensação através das escovas. As escovas sobrecarregadas aquecem mais que as outras e, sendo de carvão, sofrem uma redução considerável de resistência elétrica, o que contribui para acentuar ainda mais a circulação da corrente de compensação.

Na escovas sobrecarregadas produz-se desgaste excessivo e produção de faíscas que prejudicam o comutador e diminuem o rendimento da máquina. Por esta razão, quando necessário, recorre-se a dispositivos especiais para evitar o inconveniente.

O processo usado é o de ligar entre si todos os pontos entre os quais existe ou deveria existir uma perfeita simetria em relação aos fenômenos da indução eletromagnética e que, portanto, deveriam possuir o mesmo potencial. Tais ligações chamam-se conexões eqüipotenciais ou de compensação.

Através do enrolamento e das conexões eqüipotenciais circula então uma corrente alternada que por efeito da lei de Joule produz aumento de aquecimento do induzido, melhoria do funcionamento do conjunto escovas-comutador e eliminação das dissimetrias magnéticas.

As Figs. 31 e 32 representam um enrolamento imbricado para dínamo com 6 pólos, respectivamente sem e com as conexões eqüipotenciais.

Em geral não se executam todas as ligações eqüipotenciais possíveis, pois a metade das mesmas resulta suficiente. As ligações podem ser feitas diretamente sobre o comutador ou sobre o enrolamento. Quando feitas no comutador, ficam localizadas entre o comutador e a armadura do induzido, ficando por baixo dos condutores induzidos.

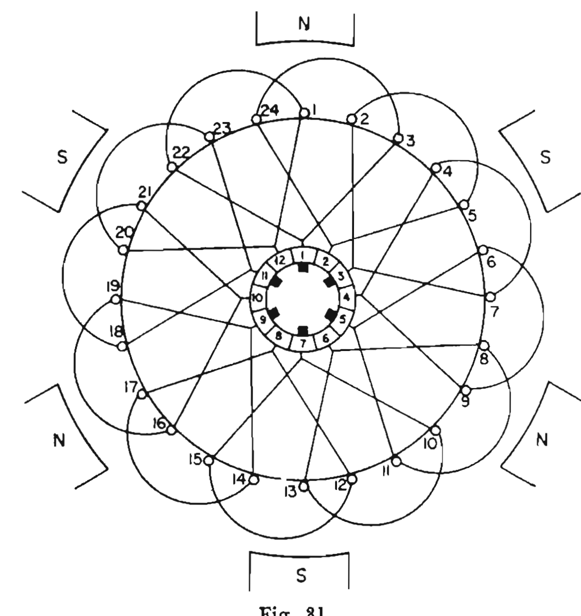


Fig. 31

20 — Cálculo dos passos do enrolamento ondulado

Foi examinado no parágrafo 10 que o enrolamento ondulado executa-se com os passos Y_1 e Y_2 no mesmo sentido, ligando sempre um condutor embaixo de um pólo com o condutor embaixo do pólo sucessivo, dando voltas sucessivas ao induzido.

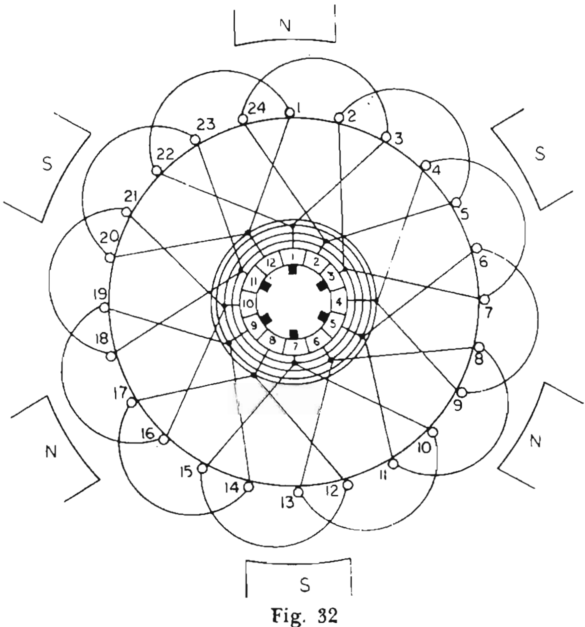


Fig. 32

Neste tipo de en-

rolamento os passos Y_1 e Y_2 podem ser iguais entre si e o fato de ser Y_1 maior ou menor que Y_2 não determina que o enrolamento seja progressivo ou regressivo. A condição de ser o enrolamento progressivo ou regressivo depende do passo total $Y = Y_1 + Y_2$. Se o passo total for maior que duas vezes o passo polar, isto é, se $Y = Y_1 + Y_2 > 2\tau$, o enrolamento é progressivo, conforme Fig. 33 (a), pois ele progride para a direita. Se, pelo contrário, verifica-se que $Y < 2\tau$, o enrolamento é regressivo, conforme Fig. 33 (b), pois progride pela esquerda.

Para evitar que o enrolamento se feche depois de uma volta ao redor do induzido, o passo resultante Y deve ser levemente inferior ou superior ao duplo passo polar

$$2\tau = \frac{F}{p}.$$

As condições do induzido exigem que Y_1 e Y_2 sejam ímpares e portanto Y par. As fórmulas relativas aos enrolamentos ondulados são as seguintes:

$$Y = Y_1 + Y_2 = \frac{F \pm 2}{p}; \quad Y_c = \frac{Y}{2} = \frac{Y_1 + Y_2}{2} = \frac{F \pm 2}{2p}$$

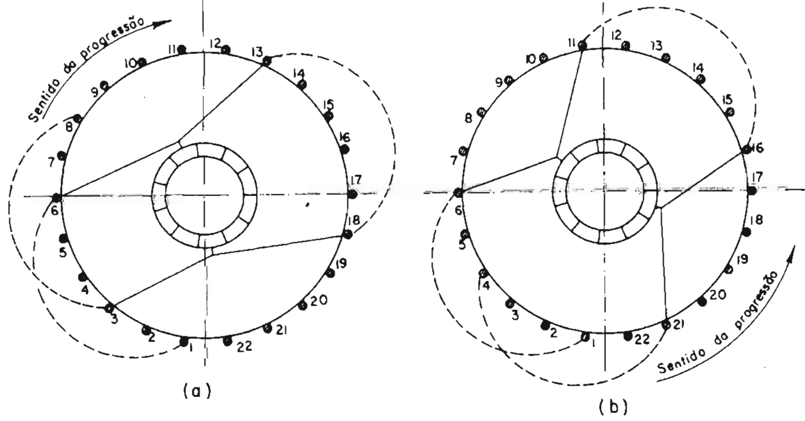


Fig. 33

Nas fórmulas escritas, o sinal (+) refere-se ao enrolamento progressivo e o sinal (—) ao enrolamento regressivo.

Também no enrolamento ondulado o passo às ranhuras deve ser um número inteiro a fim de se ter a certeza de que todas as bobinas resultam iguais. Seu valor é fornecido por:

$$Y_n = \frac{Y_1 - 1}{m}$$

onde m representa o número de lados de elementos por ranhura. A relação antes escrita é sempre satisfeita por $m = 2$, o que pode não ocorrer quando m é múltiplo de 2, ocasião em que é preciso modificar os passos Y_1 e Y_2 convenientemente.

No enrolamento ondulado pode ocorrer a necessidade de se ter que usar um número ímpar de elementos e por conseguinte um número ímpar de lâminas no comutador. Nas máquinas tetrapolares, por exemplo, verifica-se:

$$Y_c = \frac{Y}{2} = \frac{F \pm 2}{2p}, \text{ sendo } 2p = 4; \; Y_c = \frac{F \pm 2}{4}$$

Substituindo-se F por 2Z, pois o número de lados de elementos é o dobro do número de lâminas (Z) do comutador, obtém-se

$$Y_c = \frac{2Z \pm 2}{2} = \frac{Z \pm 1}{2} \text{ de onde } Z = 2Y_c \pm 1$$

sendo ($2\,Y_c$) necessariamente par, o número de lâminas (Z) do comutador deve resultar ímpar. Sendo Z ímpar, também o número de elementos deve ser ímpar. Se cada ranhura possuir 2 lados de elementos o problema é facilmente resolvido, se o número das ranhuras for ímpar também, pois o número de ranhuras é igual ao número dos elementos.

Se cada ranhura contiver 4 lados de bobinas, o conjunto de ranhuras dará sempre lugar a um número par de elementos, o que obriga a excluir um elemento do enrolamento. A exclusão do mencionado elemento é feita somente eletricamente, pois a exclusão física daria origem a desequilíbrio mecânico do induzido. Pelo exposto resulta que sendo par o número de elementos montados no induzido, um deles deverá ter seus bornes isolados, a fim de não tomar parte do circuito elétrico do induzido. A este elemento isolado dá-se o nome de "bobina morta".

21 — Enrolamento ondulado com espira de compensação

Foi visto no parágrafo precedente que nos enrolamentos ondulados com 4 pólos e 4 lados de elementos por ranhura, há necessidade de se excluir um destes elementos (bobina morta) a fim de que o enrolamento possa fechar-se.

É possível evitar a "bobina morta" empregando-se uma simples espira, chamada espira de compensação. A espira de compensação, comportando-se como um elemento completo, torna ímpar o número total dos elementos e torna exeqüível o enrolamento.

A espira de compensação é constituída por um condutor, com a mesma seção dos condutores induzidos, que forma uma ponte permanente entre duas lâminas do comutador. O passo de ligação da espira deve ser igual ao passo ao comutador Y_c do enrolamento.

Exemplo — Calcular os passos e as lâminas do comutador do enrolamento ondulado tetrapolar com 25 ranhuras e 4 lados de elementos por ranhura.

Solução:

O número de lados de elementos montados nas ranhuras resulta: $25 \cdot 4 = 100$. Com 100 lados de elementos o enrolamento não é possível, pois:

$$Y = \frac{F \pm 2}{p} = \frac{100 \pm 2}{2} = \begin{cases} 51 \\ 49 \end{cases}$$

Sendo 51 e 49 números ímpares, o enrolamento não é exeqüível.

Para tornar o enrolamento exeqüível deixa-se um elemento desligado (bobina morta) ou usa-se a espira de compensação.

I — *Solução com bobina morta* — Deixando-se um elemento desligado resulta $F = 100 - 2 = 98$; o enrolamento é possível, pois resulta:

$$Y = \frac{F \pm 2}{p} = \frac{98 \pm 2}{2} = \begin{cases} 48 \\ 50 \end{cases} \quad \text{ambos números pares}$$

Optando pelo enrolamento regressivo, usa-se $Y = 48$, de onde resulta $Y_1 = 25$ e $Y_2 = 23$, ambos ímpares. O enrolamento é possível, pois

$$Y_n = \frac{Y_1 - 1}{m} = \frac{25 - 1}{4} = 6 \qquad Y_c = \frac{Y}{2} = \frac{48}{2} = 24$$

O número de lâminas no comutador resulta: $Z = \frac{F}{2} = \frac{98}{2} = 49.$

II — *Solução com espira de compensação* — Empregando-se a espira de compensação, o número de lados de elementos resulta

$$F = 100 + 2 = 102;$$

o enrolamento é possível pois resulta:

$$Y = \frac{F \pm 2}{p} = \frac{102 \pm 2}{2} = \begin{cases} 52 \\ 50 \end{cases} \quad \text{ambos números pares.}$$

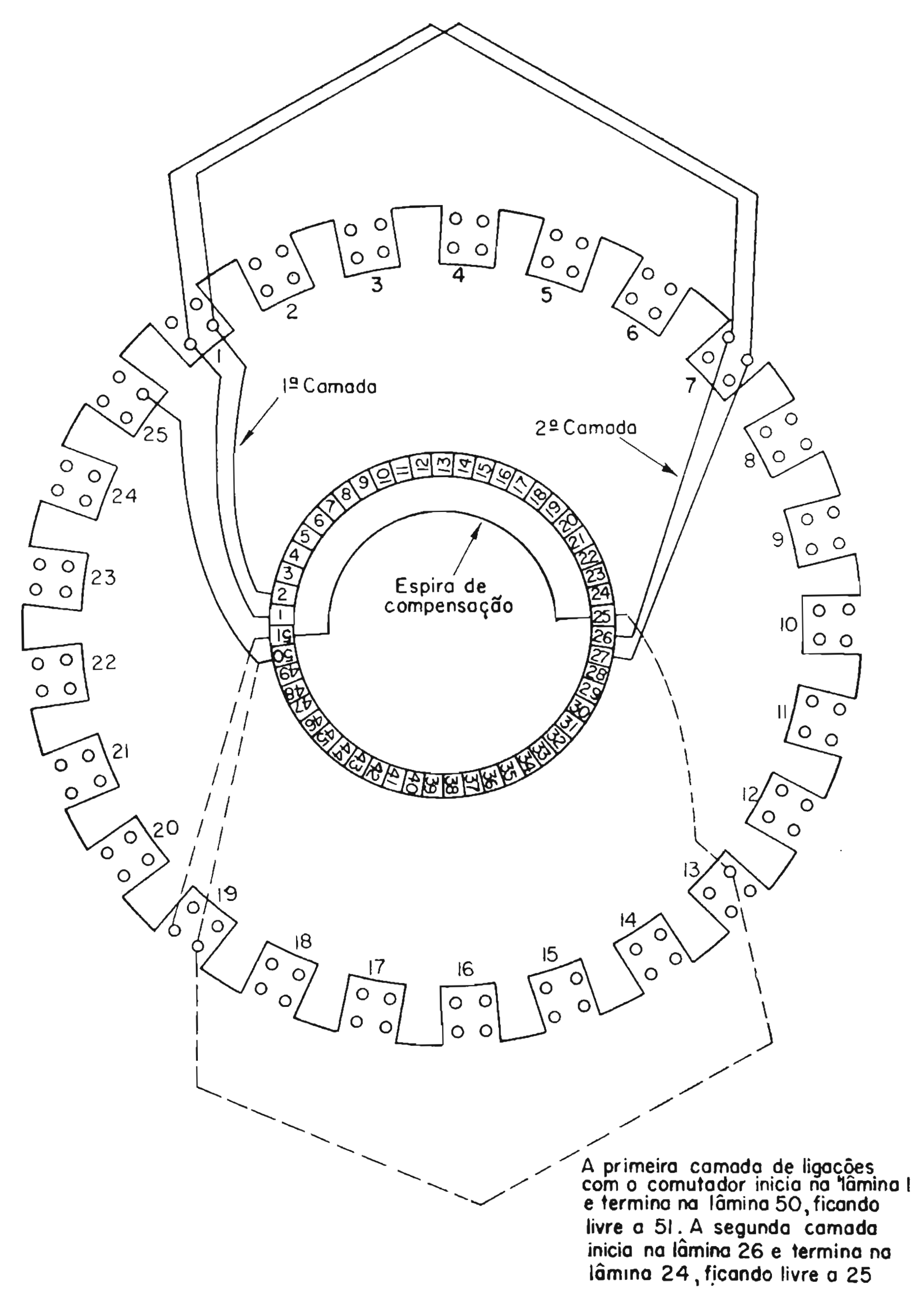

1ª Camada
2ª Camada
Espira de compensação
A primeira camada de ligações com o comutador inicia na lâmina 1 e termina na lâmina 50, ficando livre a 51. A segunda camada inicia na lâmina 26 e termina na lâmina 24, ficando livre a 25

Fig. 34

Optando pelo enrolamento regressivo, isto é, $Y = 50$ e estabelecendo $Y_1 = 25$ e $Y_2 = 25$, ambos ímpares, o enrolamento é possível, pois como foi visto o passo às ranhuras resulta: $Y_n = 6$.

$$Y_c = \frac{Y}{2} = \frac{50}{2} = 25$$

O número de lâminas no comutador resulta:

$$Z = \frac{F}{2} = \frac{102}{2} = 51$$

A espira de compensação deve estar ligada às lâminas 25 e 51 do esquema indicado na Fig. 34.

A camada inferior das ligações com o comutador inicia-se na lâmina 1 e termina na 50, ficando livre a 51. A camada superior inicia-se na lâmina 26 e termina na 24, ficando livre a 25.

22 — Exercícios de aplicação sobre enrolamentos ondulados

Exercício 1

Calcular os passos do enrolamento ondulado, tetrapolar, com 99 ranhuras, tendo 2 lados de elementos por ranhura.

Solução:

$$F = 99 \cdot 2 = 198; \quad 2p = 4; \qquad m = 2$$

$$Y = \frac{F \pm 2}{p} = \frac{198 \pm 2}{2} = \begin{cases} 100 \\ 98 \end{cases}$$

Sendo Y número par, o enrolamento é possível. Optando pelo enrolamento regressivo resulta:

$$Y_1 = 49; \; Y_2 = 49; \; Y_n = \frac{Y_1 - 1}{m} = \frac{49 - 1}{2} = 24$$

$$Y_c = \frac{Y}{2} = \frac{98}{2} = 49; \; Z = 2\, Y_c + 1 = 2 \cdot 49 + 1 = 99$$

Exercício 2

Calcular os passos do enrolamento tetrapolar ondulado, com 33 ranhuras, tendo 4 lados de elemento por ranhura.

Solução:

$$F = 33 \cdot 4 = 132$$

$$Y = \frac{F \pm 2}{p} = \frac{132 \pm 2}{2} = \begin{cases} 67 \\ 65 \end{cases}$$

Resultando Y número ímpar, o enrolamento não é exeqüível, sem recorrer à bobina morta ou à espira de compensação.

Solução com bobina morta

$$F = 132 - 2 = 130;$$

$$Y = \frac{F \pm 2}{p} = \frac{130 \pm 2}{2} = \begin{cases} 66 \\ 64 \end{cases}$$

Optando pelo enrolamento regressivo, resulta:

$$Y = 64; \ Y_1 = 33; \ Y_2 = 31; \ Y_n = \frac{Y_1 - 1}{m} = \frac{33 - 1}{4} = 8$$

$$Y_c = \frac{Y}{2} = \frac{64}{2} = 32; \ Z = 2Y_c + 1 = 2 \cdot 32 + 1 = 65$$

Solução com espira de compensação

$$F = 132 + 2 = 134; \ Y = \frac{F \pm 2}{p} = \frac{134 \pm 2}{2} = \begin{cases} 68 \\ 66 \end{cases}$$

Optando pelo enrolamento regressivo, resulta:

$$Y = 66; \ Y_1 = 33; \ Y_2 = 33; \ Y_n = \frac{Y_1 - 1}{m} = \frac{33 - 1}{4} = 8$$

$$Y_c = \frac{Y}{2} = \frac{66}{2} = 33; \ Z = 2Y_c + 1 = 2 \cdot 33 + 1 = 67$$

23 — Enrolamento série-paralelo

Foi examinado que, no enrolamento ondulado, o número das vias internas *2a*, é sempre dois, seja qual for o número dos pólos. É possível, entretanto, obter-se enrolamento ondulado com um número de vias internas maior que 2, podendo o dito número de vias internas até ser maior que o número dos pólos. O enrolamento deste tipo, com um número de vias internas maior que 2, chama-se enrolamento "série-paralelo". Os vários circuitos distintos do induzido são agrupados em paralelo pelas escovas, as quais devem ter largura suficiente para cobrir completamente tantas escovas quantos forem os circuitos internos (a) do induzido.

Com este tipo de enrolamento é possível obter:

$$2a > 2; \quad 2a = 2p; \quad 2a > 2p.$$

No caso em que $2 < 2a < 2p$ as fórmulas que fornecem o passo total Y e o passo ao comutador Y_c são:

$$Y = Y_1 + Y_2 = \frac{F \pm 2a}{p}; \quad Y_c = 2\,\frac{\dfrac{F}{2} \pm a}{p}$$

No caso em que $2p = 2a > 2$ as fórmulas que fornecem o passo total Y e o passo ao comutador Y_c são:

$$Y = Y_1 + Y_2 = \frac{F}{p} \pm 2; \quad Y_c = \frac{\dfrac{F}{2}}{p} \pm 1$$

Em todos os casos os passos Y_1 e Y_2 devem ser ímpares com valores os mais próximos possíveis. No caso de ser $2a > 2p$, Y_1 e Y_2 resultam maiores que o passo polar.

As relações $\frac{F}{2}$ e $\frac{Y}{2}$ devem ser números inteiros. Se os valores das relações $\frac{F}{2}$ e $\frac{Y}{2}$ forem primos entre si, o enrolamento possui um só circuito. Se as relações $\frac{F}{2}$ e $\frac{Y}{2}$ forem divisíveis por n, o enrolamento possui n circuitos agrupados em paralelo pelas escovas.

24 — Exercícios de aplicação sobre enrolamentos série-paralelo

Exercício 1

Calcular os passos do enrolamento série-paralelo com 6 pólos, 4 vias internas, sabendo-se que os lados de elementos são F = 142.

Solução:

Os dados são:

$$F = 142;\ 2a = 4;\ 2p = 6$$

O passo resultante é dado por:

$$Y = Y_1 + Y_2 = \frac{F \pm 2a}{p},$$ de onde, adotando o sinal

negativo, resulta: $$Y = \frac{142 - 4}{3} = 46$$

Os passos Y_1 e Y_2 resultam:

$$Y_1 = Y_2 = 23$$

O enrolamento é possível pois as relações

$$\frac{F}{2} \text{ e } \frac{Y}{2}, \text{ isto é, } \frac{142}{2} \text{ e } \frac{46}{2}$$

ou seja 71 e 23 são números inteiros. Pelo fato dos dois números 71 e 23 serem primos entre si, o enrolamento terá um único circuito.

O passo ao comutador é dado por:

$$Y_c = \frac{\dfrac{F}{2} \pm a}{p}.$$

Adotando o sinal negativo resulta:

$$Y_c = \frac{71 - 2}{3} = \frac{69}{3} = 33.$$

Exercício 2

Calcular os passos do enrolamento série-paralelo cujos dados são:

$$F = 204;\ 2a = 2p = 6.$$

Solução:

O passo resultante é dado por

$$Y = Y_1 + Y_2 = \frac{F}{p} \pm 2$$

Adotando o sinal positivo, obtém-se:

$$Y = \frac{204}{3} + 2 = 70$$

$$Y_1 = Y_2 = 35$$

O enrolamento é possível, pois as relações

$$\frac{F}{2} \text{ e } \frac{Y}{2} \text{ resultam } \frac{204}{2} \text{ e } \frac{70}{2},$$

isto é, 102 e 35, números inteiros, primos entre si. O enrolamento é constituído por um único circuito.

O passo ao comutador resulta

$$Y_c = \frac{F/2}{p} \pm 1 = \frac{102}{2} + 1 = 55$$

Exercício 3

Calcular os passos do induzido que tem os seguintes dados:

$$F = 192;\ 2a = 6;\ 2p = 4$$

Solução:

O passo resultante Y é dado por

$$Y = \frac{F}{p} \pm 2 = \frac{192}{2} - 2 = 94$$

Os passos anterior e posterior são

$$Y_1 = Y_2 = 47.$$

O enrolamento é possível, pois

$$\frac{F}{2} \text{ e } \frac{Y}{2} \text{ resultam } \frac{192}{2} \text{ e } \frac{94}{2}$$

(96 e 47) números inteiros primos entre si. O enrolamento possui um único circuito. O passo ao comutador é

$$Y_c = \frac{F/2}{p} - 1 = \frac{96}{2} - 1 = 47.$$

25 — Comparação entre os enrolamentos imbricados e os ondulados

Uma das vantagens que o enrolamento ondulado apresenta sobre o imbricado consiste em não ter no seu interior a circulação das correntes alternadas devidas aos desequilíbrios do fluxo magnético. Isso porque os condutores de cada circuito interno do enrolamento ondulado estão distribuídos embaixo de todos os pólos da máquina. Pelo exposto os enrolamentos ondulados não precisam das conexões eqüipotenciais, o que para os grandes induzidos representa economia considerável.

Outra vantagem do enrolamento ondulado é o fato de que este necessita somente de dois jogos de escovas, que podem ser colocados na parte superior do comutador, a fim de facilitar a inspeção e manutenção. Esta é uma das razões que tornou o enrolamento ondulado universalmente usado nos motores destinados à tração elétrica.

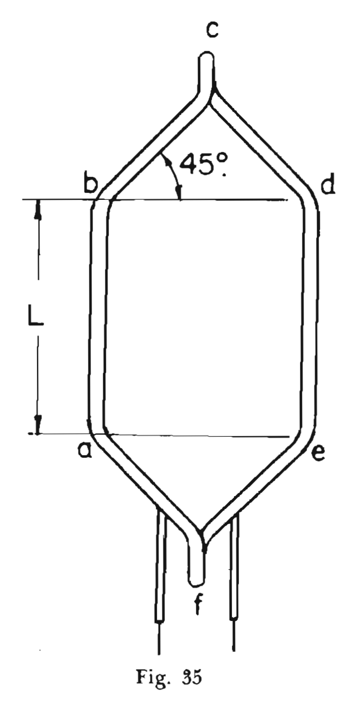


Fig. 35

26 — Cálculo da resistência interna de um induzido — Resistência medível entre as escovas

O comprimento exato de uma espira pode ser conhecido somente quando o enrolamento estiver montado, mas um primeiro valor aproximado pode ser determinado observando-se que cada espira é composta de duas partes, isto é: a) trecho na ranhura e b) cabeças da bobina.

a) *Trecho na ranhura* — Corresponde ao comprimento ativo *L* dos dois lados da bobina, que resultaram imersos no pacote laminado do induzido. Cada espira é constituída por dois lados, e o comprimento do trecho na ranhura *2L,* onde *L* representa o comprimento geométrico da armadura induzida, expressa em metros.

b) *Cabeças da bobina* — O comprimento das duas cabeças da bobina (b-c-d) e (a-f-e), Fig. 35, depende da forma das

mesmas. Se, porém, a inclinação dos lados for 45°, como mostra a figura, o comprimento das duas cabeças pode ser calculado com suficiente aproximação como sendo igual a 2,8 τ, onde τ é o passo polar expresso por:

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}$$

na qual *D* é o diâmetro do induzido em metros e *2p* o número dos pólos da máquina.

Pelo exposto, o **comprimento aproximado de uma espira** é $2L + 2{,}8\ \tau$. Conhecendo-se o número das espiras totais N_s, que compõem o induzido, o comprimento total do fio enrolado resulta:

$$L_f = (2L + 2{,}8\ \tau)\ N_s = (2L + 2{,}8 \frac{\pi D}{2p})\ N_s$$

O número N_s das espiras corresponde à metade do número dos condutores ativos do induzido.

Calculado o comprimento total do fio e conhecendo-se a seção do mesmo, é possível calcular-se a sua resistência à temperatura de 75°C, que resulta:

$$R_f = 10^{-2} \cdot \rho \frac{l}{S}$$

na qual R_f é expressa em ohm, se ρ for expressa em microohm-centímetro (a 75°C para o cobre $\rho = 2{,}16$), *l* em metros e *S* em milímetros quadrados.

A resistência do induzido medível entre as escovas depende do número de vias internas do enrolamento, sendo expressa por

$$R_i = \frac{R_f}{(2a)^2}$$

27 – Queda de tensão interna e perdas por efeito joule no induzido

A corrente da máquina, ao atravessar a resistência interna do induzido (R_i), provoca a queda de tensão expressa por:

$$\Delta V = R_i \cdot I$$

Além da mencionada queda de tensão processa-se uma perda de potência elétrica que se transforma em calor. Tal perda é dada por:

$$W_{cu} = R_i \cdot I^2 = \Delta V \cdot I$$

É conveniente que tanto a queda de tensão como a perda de potência sejam reduzidas a valores mínimos, a fim de aumentar o rendimento da máquina. Para alcançar este objetivo, a densidade de corrente nos condutores induzidos é escolhida entre valores baixos que em hipótese alguma podem superar 6 A/mm².

As perdas por efeito joule produzem o aquecimento dos enrolamentos, e devem ser o quanto mais reduzidas possível, pois o isolamento dos condutores admite a temperatura máxima de 75°C.

CAPÍTULO II

28 — Comutador ou coletor de lâminas

O comutador é o elemento que permite utilizar, sob forma de f.e.m. e de corrente unidirecional constante, as f.e.m. e as correntes alternadas geradas nos condutores induzidos por efeito dos fenômenos de indução eletromagnética.

O comutador é constituído por uma série de segmentos de cobre laminado, de seção trapezoidal, unidos em forma de coroa circular. Cada segmento, ou lâmina, está isolado do segmento adjacente, por meio de uma lâmina de mica, conforme Fig. 36.

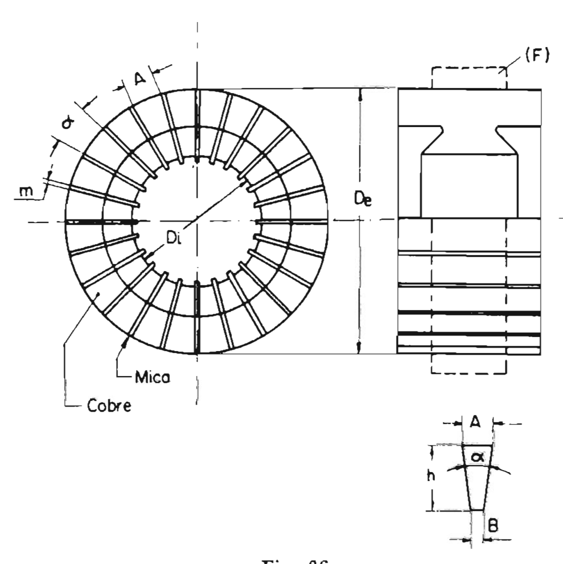


Fig. 36

As dimensões do cobre laminado são fornecidas pela Fig. 36, pois se Z for o número de lâminas, (tanto de cobre como mica), se *m* é a espessura da mica empregada, a espessura *A* da lâmina é fornecida por:

$$A = \frac{\pi\ D_e - m \cdot Z}{Z}$$

A espessura *B* resulta:

$$B = \frac{\pi\ D_i - m \cdot Z}{Z}$$

O ângulo α entre as faces da lâmina corresponde a:

$$\alpha = \frac{360^\circ}{Z}$$

A altura h da lâmina resulta:

$$h = \frac{D_e - D_i}{2}$$

O conjunto das lâminas é mantido unido no decorrer da montagem e da usinagem do comutador por um anel de ferro (F), montado a quente, o qual ao esfriar contrai-se e aperta o conjunto de lâminas de forma a torná-lo um bloco sólido. Uma vez terminada a montagem o anel é retirado.

A espessura da lâmina de mica varia entre 0,5 mm a 1 mm. Em geral o comutador, para trabalhar bem, não deve ter mais que 12% de material isolante na sua periferia. Assim sendo, a menor espessura (A) da lâmina de cobre deve resultar da seguinte proporção:

$$0{,}5 : x = 12:100 \text{ de onde}$$

$$x = \frac{0{,}5 \cdot 100}{12} = 4 \text{ mm}$$

O menor passo às lâminas do comutador resulta:

$$\tau_c = 4 + 0{,}5 = 4{,}5 \text{ mm}$$

O diâmetro D_c da superfície de trabalho do comutador deve estar nos seguintes limites:

Para induzidos com diâmetro D compreendido entre 20 e 50 cm, o diâmetro do comutador deve resultar:

$$D > D_c > D - 2h_r$$

onde h_r é a altura das ranhuras do induzido.

Para induzidos com diâmetro D compreendido entre 50 e 400 cm, o diâmetro do comutador deve resultar:

$$0{,}85\ D > D_c > 0{,}6\ D$$

Para que o comutador possa funcionar bem, a sua velocidade periférica não deve exceder os 20 m por segundo. Conhecendo-se o diâmetro do comutador D_c e o número de rotações por minuto n, a velocidade periférica em metros por segundo é dada por:

$$v = \frac{\pi \cdot D_c \cdot n}{60}$$

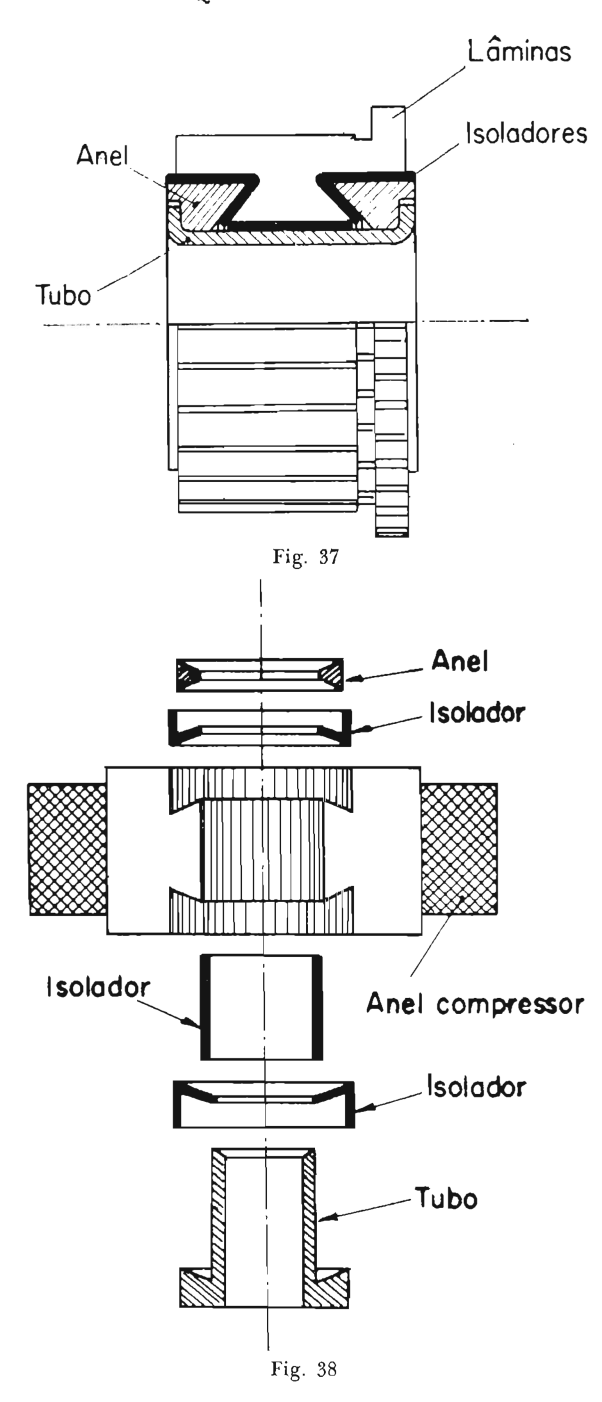


Fig. 37

Fig. 38

O comprimento axial do comutador depende do comprimento das escovas e do calor devido às perdas, que deve ser irradiado, o que será examinado mais adiante.

O conjunto das lâminas é preso por meio de anéis de ferro, isolados com aros de micanite. Nos pequenos comutadores a montagem é feita conforme Figs. 37 e 38 nas quais a compressão é exercida pelo tubo suporte prensado.

Nos comutadores de grande capacidade a montagem é feita conforme as Figs. 39 e 40, nas quais a compressão é exercida, respectivamente, pela rosca do anel ou por meio de parafusos.

Uma vez formado o comutador, aquece-se num forno e apertam-se os parafusos, a fim de expulsar a cola dos isoladores de micanite, após o que retira-se o anel de ferro compressor e torneia-se a superfície de trabalho.

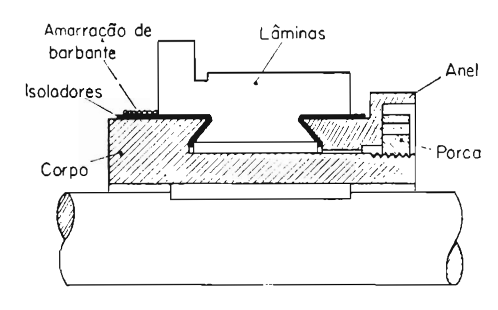


Fig. 39

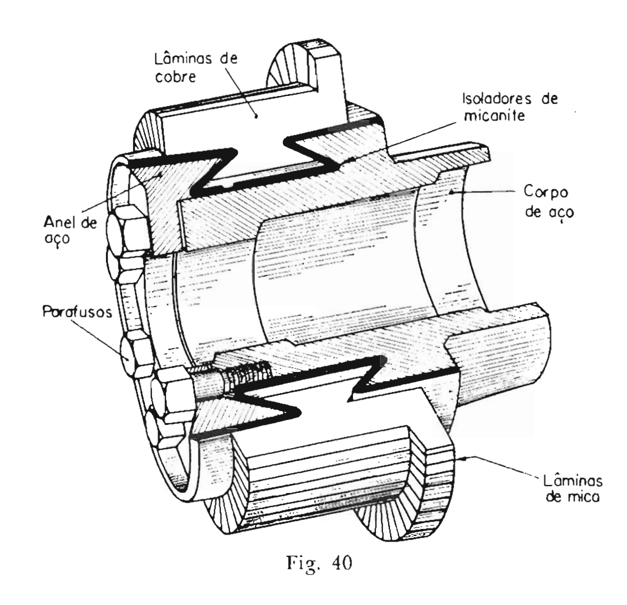


Fig. 40

29 — Tensão entre lâminas adjacentes

A tensão entre duas lâminas adjacentes do comutador depende da tensão da máquina e do número de lâminas compreendidas entre duas escovas consecutivas.

O número de lâminas compreendidas entre duas escovas consecutivas corresponde ao número de lâminas embaixo de um pólo. Este fato é compreensível, pois nos enrolamentos imbricados o número de escovas coincide com o número de pólos e nos enrolamentos ondulados, embora usem-se somente duas escovas, seja qual for o número de pólos, é possível usar tantas escovas quantos forem os pólos da máquina.

Nestas condições a tensão entre lâminas adjacentes do comutador é expressa por:

$$\Delta V = \frac{E}{Z/2p} = \frac{2p \cdot E}{Z} \leqq 16 \text{ volts.}$$

A tensão admissível entre duas lâminas adjacentes do comutador não deve ser maior que 16 volts. Se esta tensão alcançar valores acima dos 30 volts, com facilidade pode-se estabelecer um arco entre as lâminas que leva à formação de um arco de escova para escova, provocando estragos no comutador e nas escovas.

30 — Escovas

As escovas são os órgãos que permitem, por meio de contato deslizante com o comutador, o aproveitamento das f.e.m. e da corrente do dínamo, alimentar um circuito externo. Sua função é complexa e delicada dependendo das mesmas o bom funcionamento da máquina.

As escovas podem ser de carvão, carvão grafitado, grafita, eletrografita, metal-carvão e metal, sendo sua escolha baseada nos seguintes critérios:

As escovas de carvão, possuidoras de elevada resistividade elétrica, são usadas nas máquinas de pequena potência, com difícil comutação e baixa velocidade periférica do comutador.

As escovas de grafita e carvão grafitado são indicadas para máquinas de média e grande potência, com elevada velocidade periférica no comutador.

As escovas de eletrografita, que são duras, pouco frágeis, mecanicamente resistentes, com baixo coeficiente de atrito, são indicadas para máquinas de elevada velocidade no comutador.

As escovas de metal-carvão são empregadas nas máquinas de baixa tensão com elevada intensidade de corrente, tais como dínamos para instalações de eletroquímica e motores de arranco de automóvel. Nestas máquinas, a fim de reduzir-se a queda de tensão e as dimensões das escovas e do comutador, é necessário que o material das escovas seja muito condutivo e admita uma elevada densidade de corrente. Além das qualidades mencionadas, o metal-carvão possui também boa condutividade térmica que lhe permite dissipar, facilmente, o calor produzido pelas perdas.

As escovas metálicas encontram raríssimas aplicações.

A tabela da Fig. 41 indica os valores característicos dos vários tipos de materiais empregados na fabricação de escovas.

Características das escovas de:	*Carvão*	*Carvão-grafita*	*Grafita*	*Eletro-grafita*	*Metal-carvão*	*Metal*
Resistividade em microohm-cm	7000	2000	1300	3000	200	30
Densidade máxima amp./cm²	6,5	8	9,5	10	12	20
Veloc. periférica do comutador em m/seg	16	25	40	40	25	25
Pressão específica g/cm²	190	170	150	180	165	140
Coeficiente de atrito	0,3	0,2	0,12	0,16	0,2	—
Queda de tensão no contato com o comutador por par de escovas	1,9	1,3	1,2	1,7	1	—

Fig. 41

31 — Porta-escovas

As escovas são centradas, guiadas e devidamente pressionadas contra o coletor, por suportes especiais chamados porta-escovas.

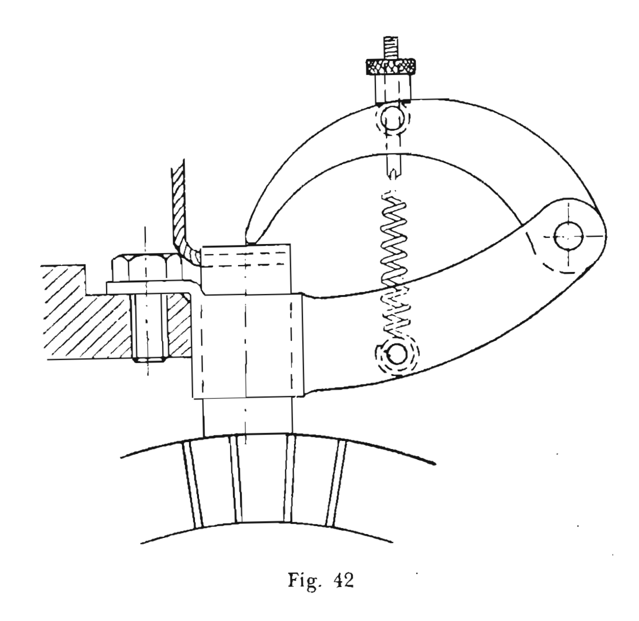


Fig. 42

Usam-se muitos tipos de porta-escovas. Os mais comuns, entretanto, são os indicados nas Figs. 42, 43, 44 e 45.

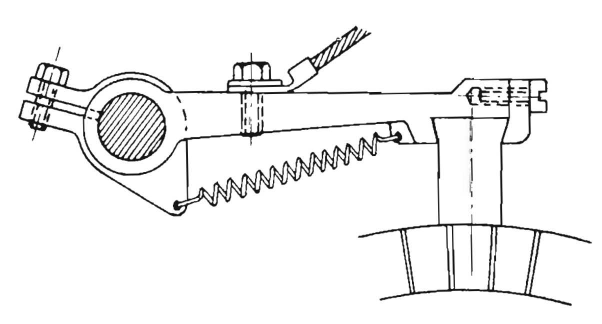


Fig. 43

Como se pode observar nas Figs. 42, 43, 44 e 45, a maioria dos porta-escovas possui um dispositivo para regular a pressão da escova. Esta regulagem é necessária, pois varia com o tipo de material e com o grau de desgaste da escova.

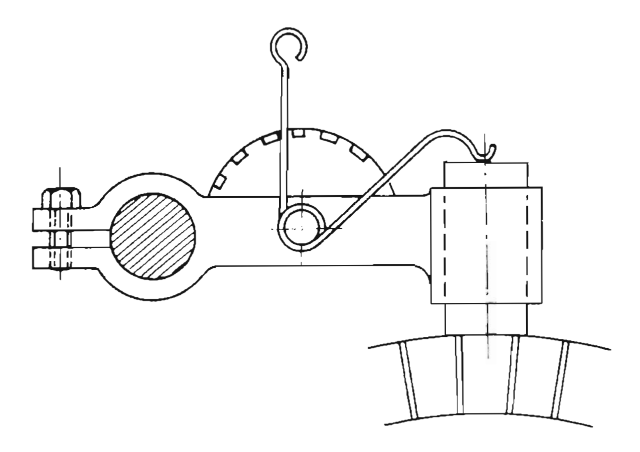


Fig. 44

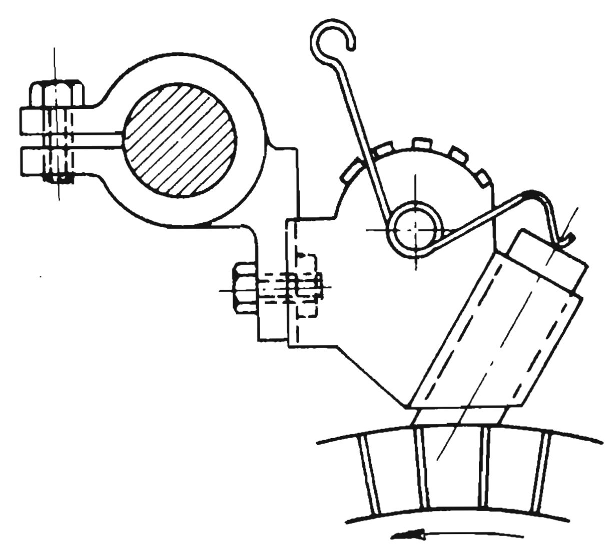


Fig. 45

32 — Perdas no comutador

A corrente que das lâminas passa para as escovas ou vice-versa determina uma perda considerável de potência que se compõe de:

a) Perdas por efeito joule nas lâminas do comutador.

b) Perdas por queda de tensão no contato entre escovas e coletor.

A estas duas perdas causadas pela corrente junta-se uma outra, puramente mecânica, devido ao atrito entre as escovas e o comutador, isto é:

c) Perdas por atrito.

As perdas por efeito joule nas lâminas do comutador dependem da corrente e da resistência elétrica das lâminas. Sendo, entretanto, a resistência elétrica destas últimas muito pequena, estas perdas podem ser desprezadas.

As perdas por queda de tensão no contato entre escovas e comutador dependem da queda de tensão que, conforme indica a tabela da Fig. 41, variam conforme o tipo do material de que as escovas são feitas. Para um determinado material a queda de tensão no contato não acompanha a lei de OHM, pois esta é praticamente constante ao variar da corrente.

As perdas em watts devidas à queda de tensão são fornecidas por:

$$W_{cv} = \Delta V \cdot I$$

onde ΔV representa a queda de tensão global das escovas positivas e negativas, fornecida pela tabela da Fig. 41.

As perdas por atrito dependem do material de que as escovas são feitas, da velocidade periférica do coletor, da pressão e da área de contato entre escovas e coletor. As perdas em watts, por atrito, são fornecidas por:

$$W_a = 9{,}81 \cdot p \cdot a \cdot S \cdot v$$

p representa a pressão específica das escovas em kg/cm².
a representa o coeficiente de atrito fornecido pela tabela da Fig. 41.
S representa a superfície total das escovas em cm².
v representa a velocidade periférica em m/seg.

33 — Aquecimento do comutador

Por efeito das perdas que se verificam no contato com as escovas, o comutador aquece. Com o aumento da temperatura, a superfície do comutador irradia calorias para o ar. O regime de equilíbrio é alcançado quando a elevação de temperatura é tal que as calorias irradiadas pelo comutador para o ar são iguais às geradas pelas perdas e a temperatura fica constante.

Os coeficientes de adução, ou seja, a quantidade de watts que um decímetro quadrado de superfície irradia para o ar, em correspondência a cada grau CELSIUS de sobrelevação de temperatura, estão indicados na tabela da Fig. 46.

A elevação da temperatura do comutador é dada por:

$$\Delta T = \frac{W_c}{S_c \cdot K}$$

onde:

W_c corresponde à perda total em watts no comutador;

S_c é a superfície cilíndrica do comutador em $dm^2 = \pi \cdot D_c \cdot L_c$;

K é o coeficiente de adução indicado na Fig. 46.

Coeficiente de Adução K	
$V = m/seg$	$W/dm^2 \ ^oC$
5	1,25
10	1,70
15	1,90
20	2,10

Fig. 46

A elevação de temperatura admissível para comutadores é de 60°C.

Exemplo: Calcular o aquecimento do comutador de um dínamo, sabendo-se que:

$I = 1300$ amp.; $D_c = 80$ cm; $L_c = 24$ cm; $n = 300$ rotações por minuto; sobre o coletor se apóiam 36 escovas de grafita de 2×6 cm.

Solução:

Se o número total das escovas for 36, haverá 18 escovas positivas e 18 negativas.

A velocidade periférica resulta:

$$v = \frac{\pi \cdot D_c \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 0,8 \cdot 300}{60} = 12,56 \text{ m/seg}$$

$$S_c = \pi \cdot D_c \cdot L_c = \pi \cdot 8 \cdot 2,4 = 60,3 \text{ dm}^2$$

Sendo as escovas de grafita e a queda de tensão $\Delta V = 1,2$ volts, o coeficiente de atrito é 0,12 e a pressão específica é $150 \text{ gr/cm}^2 = 0,15 \text{ kg/cm}^2$

Perdas por queda de tensão: $W_{cv} = \Delta V \cdot I = 1,2 \cdot 1300 = 1560$ watts.

Perdas por atrito:

$$W_a = 9,81 \cdot p \cdot a \cdot S \cdot v = 9,81 \cdot 0,15 \cdot 0,12 \cdot (36 \cdot 2 \cdot 6 \cdot) \cdot 12,56 = \sim 960 \text{ watts.}$$

Perdas totais: $W_c = 1560 + 960 = 2520$ watts.

Na tabela da Fig. 46 para $v = 12,56$ m/seg corresponde $K = 1,80$.

A elevação de temperatura do comutador fica:

$$\Delta T = \frac{W_c}{S_c \cdot K} = \frac{2520}{60,3 \cdot 1,80} = \sim 23^oC$$

34 — Disposição do induzido

A armadura do induzido deve ser constituída por um pacote laminado, a fim de reduzir as perdas por correntes parasitas a valores aceitáveis.

A laminação da armadura é feita, conforme indica a Fig. 47, no sentido da continuação dos circuitos magnéticos, o que não prejudica os mesmos.

As lâminas empregadas são de ferro normal, com a espessura de 0,5 mm, e o isolamento das mesmas é feito por meio de oxidação ou colando num dos lados das chapas uma folha de papel cuja espessura é de 0,005 mm.

As lâminas são estampadas de forma que ao serem montadas apresentem o furo central e as ranhuras. Lâminas de diâmetro inferior a 1 m são estampadas de uma só vez. As maiores são estampadas por seções.

Nas máquinas de pequena potência as lâminas são prensadas diretamente sobre o eixo. A fim de facilitar a operação, o eixo é recartilhado conforme Fig. 48.

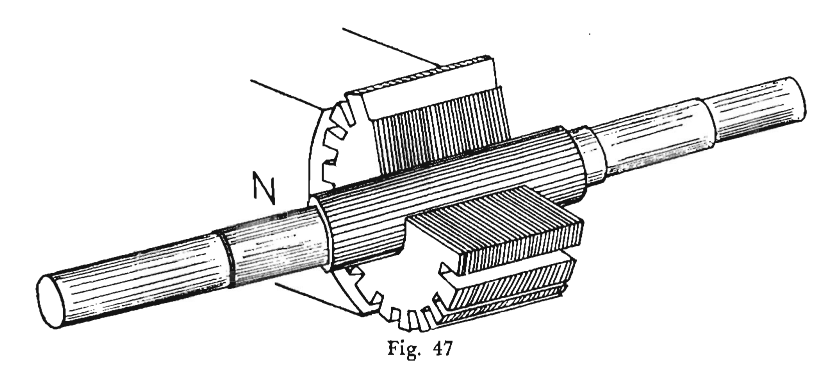


Fig. 47

O induzido de uma máquina de pequena potência, com lâminas diretamente prensadas no eixo, está representado na Fig. 49.

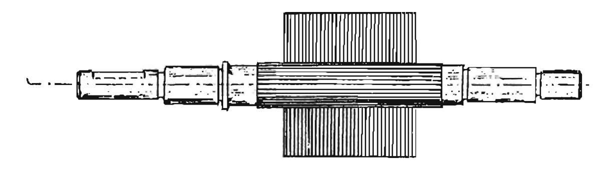


Fig. 48

Outro tipo de construção usada para dínamos de pequena potência é o indicado na Fig. 50, no qual as lâminas são presas ao eixo por meio de uma chaveta e de um anel roscado.

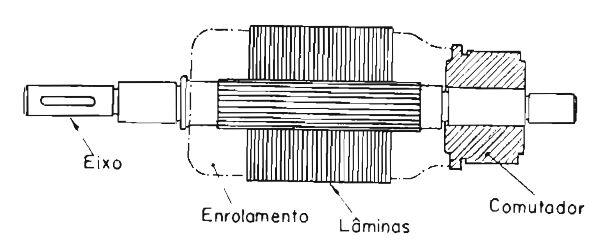


Fig. 49

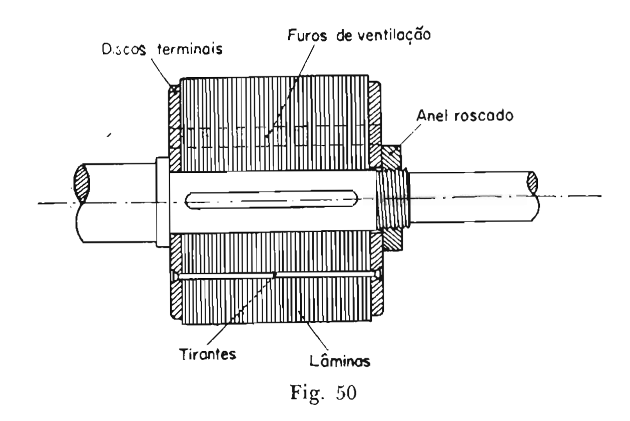


Fig. 50

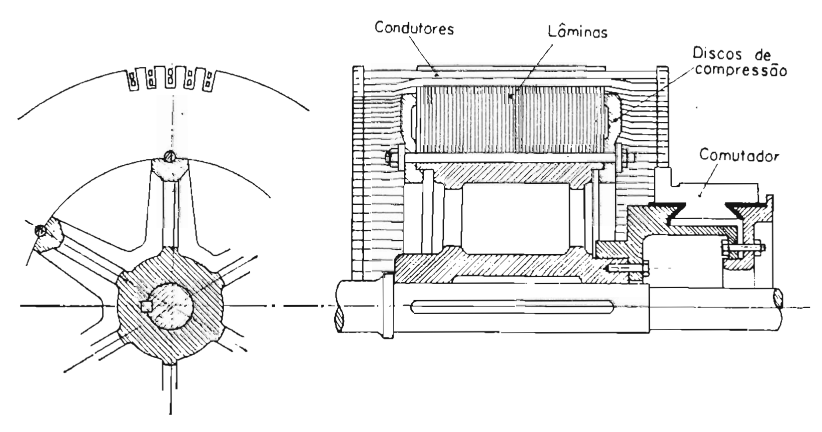


Fig. 51

Nos dínamos de grande potência a coroa de lâminas é montada sobre um suporte de braços por meio de parafusos. Estes últimos desempenham também a tarefa de comprimir o pacote por meio dos discos frontais. O suporte de braços é preso ao eixo por meio de chaveta, conforme Fig. 51. Na figura é visível, também, o comutador com as hastes de ligação às barras induzidas.

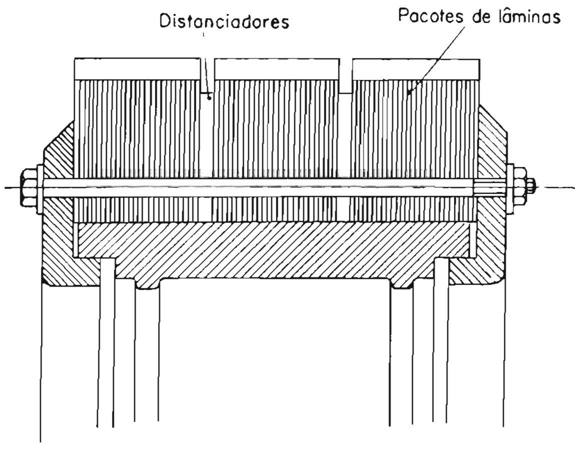


Fig. 52

A Fig. 52 mostra a construção da armadura de um induzido de grande potência, o qual, para facilitar a irradiação do calor devido às perdas, foi construído subdividido em pacotes de 10 cm de comprimento, ficando entre um pacote e outro um canal de ventilação com 1 cm de comprimento.

CAPÍTULO III

35 — Sistema indutor das máquinas de corrente contínua

O sistema indutor das máquinas de corrente contínua compõe-se de uma carcaça em forma de anel, na qual estão presos os pólos. A carcaça, além de fechar os circuitos magnéticos da máquina, funciona, também, como suporte do conjunto e por isso é provida de pés de fixação, conforme Fig. 53.

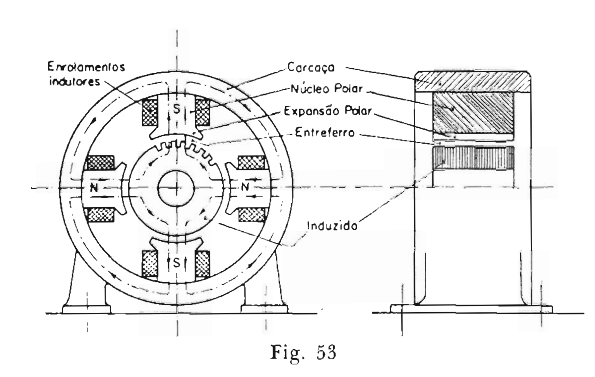


Fig. 53

Os pólos magnéticos são constituídos de duas partes, isto é, os núcleos polares e as expansões. Sobre o núcleo está montada a bobina indutora. A expansão que fixa a bobina indutora tem a finalidade de expandir o fluxo magnético no entreferro, a fim de que a indução magnética do mesmo fique reduzida.

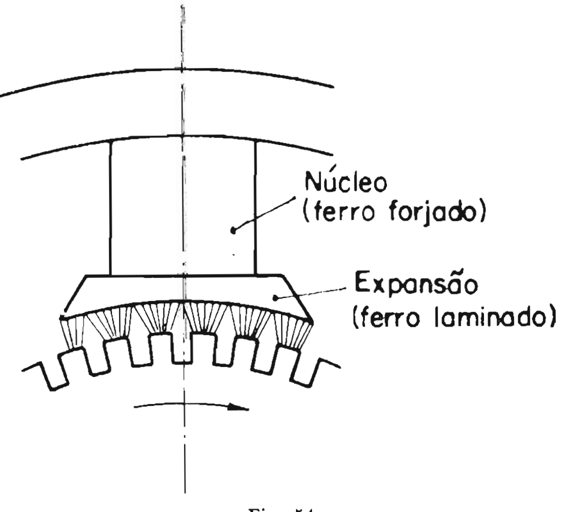


Fig. 54

A carcaça em geral é de aço fundido. Os núcleos polares podem ser feitos de ferro forjado ou de ferro laminado.

Quando o núcleo for de ferro forjado, é conveniente que a expansão polar seja feita com lâminas de ferro. O emprego das lâminas tem a finalidade de reduzir as perdas por correntes de FOUCAULT, produzidas pelas variações de fluxo, de-

vidas à passagem alternada dos dentes e das ranhuras, embaixo da expansão, conforme indica a Fig. 54.

A Fig. 55 mostra a fixação na carcaça de um pólo constituído por um núcleo de ferro forjado e expansão de ferro laminado.

A Fig. 56 mostra a fixação à carcaça de um pólo totalmente feito com ferro laminado. Os parafusos de fixação atarraxam-se em furos rosqueados, realizados diretamente no bloco laminado.

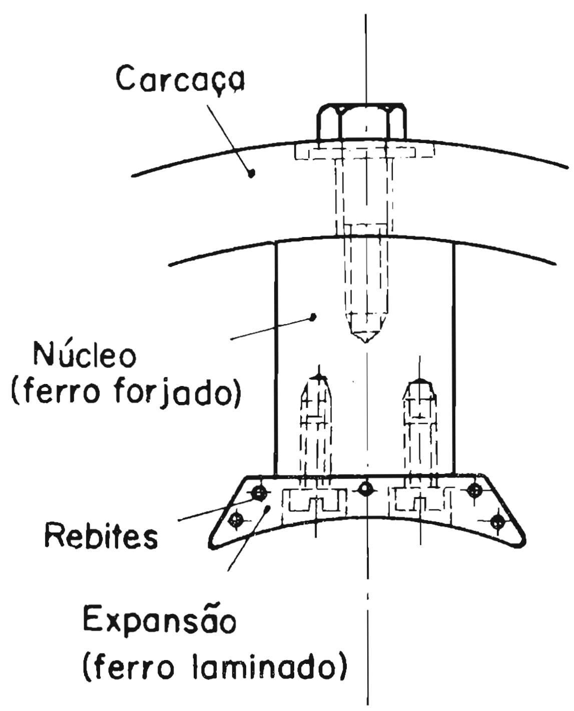


Fig. 55

36 — Tipos de excitação das máquinas de corrente contínua

O funcionamento dos dínamos baseia-se na geração da f.e.m. que se produz nos condutores induzidos quando estes rodam num campo magnético intenso. Este campo magnético é produzido por meio de bobinas percorridas por corrente contínua. Estas bobinas e a respectiva corrente que as atravessa são chamadas bobinas e corrente de excitação ou de campo. O conjunto destas bobinas, eletricamente ligadas, constitui o circuito de excitação da máquina.

A alimentação do circuito de excitação pode ser feita de várias maneiras, das quais a mais simples consiste na utilização de uma bateria de acumuladores, conforme indica a Fig. 57 (a). Em série ao circuito de excitação está um reostato R_c, chamado reostato de campo, cuja fina-

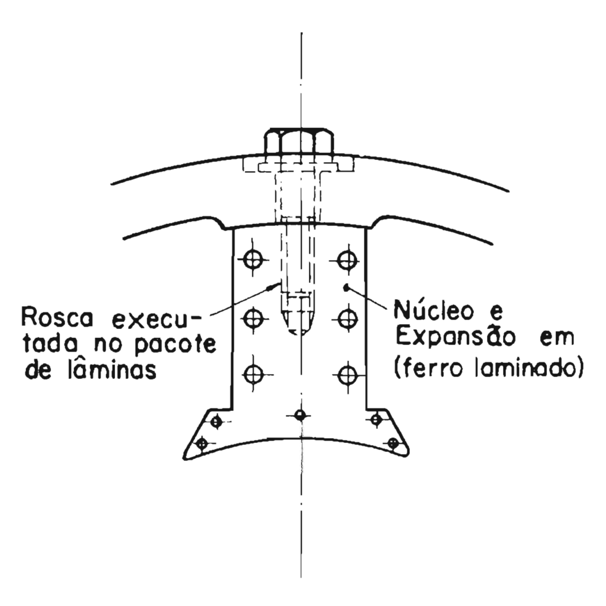


Fig. 56

lidade é regular a corrente de excitação e, portanto, o fluxo e a f.e.m. da máquina.

A Fig. 57 (b) representa esquematicamente o dínamo com excitação independente da Fig. 57 (a). O tipo do dínamo descrito chama-se de excitação separada ou independente.

A excitação separada encontra raras aplicações, pois implica na necessidade de uma fonte auxiliar de corrente contínua. Por outro lado, se o próprio dínamo produz corrente contínua, é lógico pensar na utilização desta corrente para alimentar o seu circuito de excitação. Os dínamos que utilizam sua própria corrente para alimentar o circuito de excitação chamam-se auto-excitados.

A auto-excitação de um dínamo é possível pelo fato do ferro do circuito magnético conservar uma pequena quantidade de magnetização residual, depois de ter sido magnetizado por meio do emprego de uma fonte auxiliar de corrente contínua.

Acionando a máquina com magnetismo residual, o induzido roda num campo magnético, que, embora muito fraco, produz nos condutores uma pequena f.e.m. Se o induzido estiver ligado ao circuito de excitação, a f.e.m. induzida faz circular neste último uma corrente que, embora reduzida, reforça o campo, o que faz aumentar a diferença de potencial entre as escovas.

O aumento da diferença de potencial aumenta a corrente de excitação e esta por sua vez a diferença de potencial e assim sucessivamente até que a tensão da máquina alcance o seu valor normal.

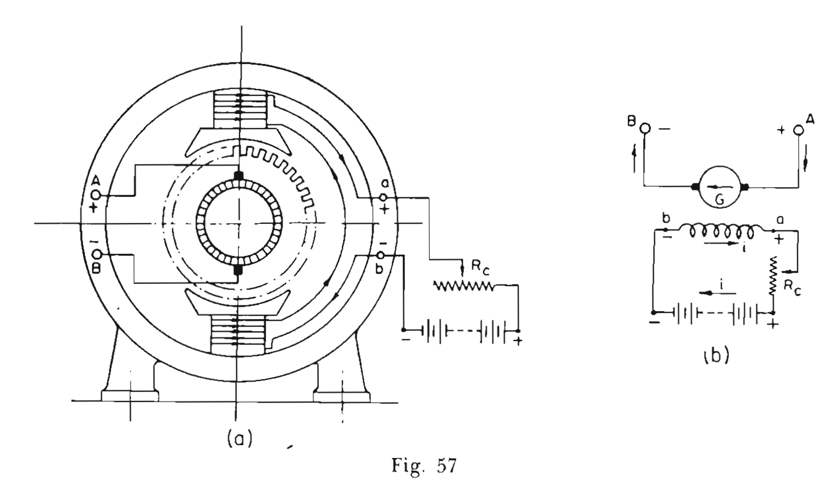


Fig. 57

Os processos de auto-excitação dos dínamos são três, isto é:

— Excitação em derivação
— Excitação em série
— Excitação composta (*compound*)

A excitação em derivação realiza-se conforme Fig. 58 (a), isto é, ligando aos bornes da máquina o circuito de excitação, o qual resulta alimentado diretamente pela tensão da máquina.

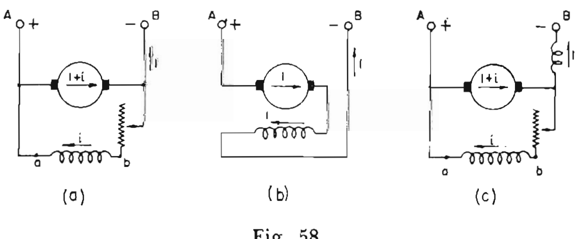


Fig. 58

A excitação em série realiza-se conforme Fig. 58 (b), isto é, conectando o enrolamento de excitação entre o induzido do dínamo e o circuito externo, de forma que a própria corrente fornecida ao circuito de utilização atue como corrente de excitação.

A excitação composta (*compound*) realiza-se, conforme Fig. 58 (c), da combinação dos dois tipos de excitação antes descritos. Assim sendo, a máquina possui um enrolamento de excitação em derivação e outro de excitação em série.

37 — Bobinas indutoras para excitação em derivação

As bobinas indutoras para máquinas com excitação em derivação são caracterizadas por possuírem muitas espiras com fio fino. Este fato, além de tornar fácil sua fabricação, faz com que as ampère-espiras necessárias sejam produzidas com uma corrente de pequena intensidade, isto é, aproximadamente 5% da intensidade da corrente que a máquina pode fornecer ao circuito utilizador. É conveniente que o valor da corrente de excitação seja pequeno, pois nas máquinas de excitação em derivação esta corrente deve ser fornecida pelo próprio induzido da máquina.

As bobinas indutoras são enroladas sobre formas especiais, encadarçadas e envernizadas para, uma vez prontas, serem montadas sobre os núcleos polares da máquina.

O revestimento de algodão do condutor é suficiente para isolar as espiras entre si, mas não é suficiente para isolar a bobina da estrutura metálica da máquina. Por isso, a bobina precisa ser encadarçada, conforme indica a Fig. 59 (a).

A fim de proporcionar às bobinas resistência mecânica e isolamento seguro, usam-se placas isolantes do tipo indicado na Fig. 59 (b). Estas placas são colocadas nas bobinas antes das mesmas serem encadarçadas.

Ocorre em certos casos, como por exemplo nas máquinas bipolares, que as bobinas devem ser curvas, conforme indica a Fig. 60. A curvatura da bobina é obtida por meio de estampos especiais.

Nas máquinas de pequena potência, co-

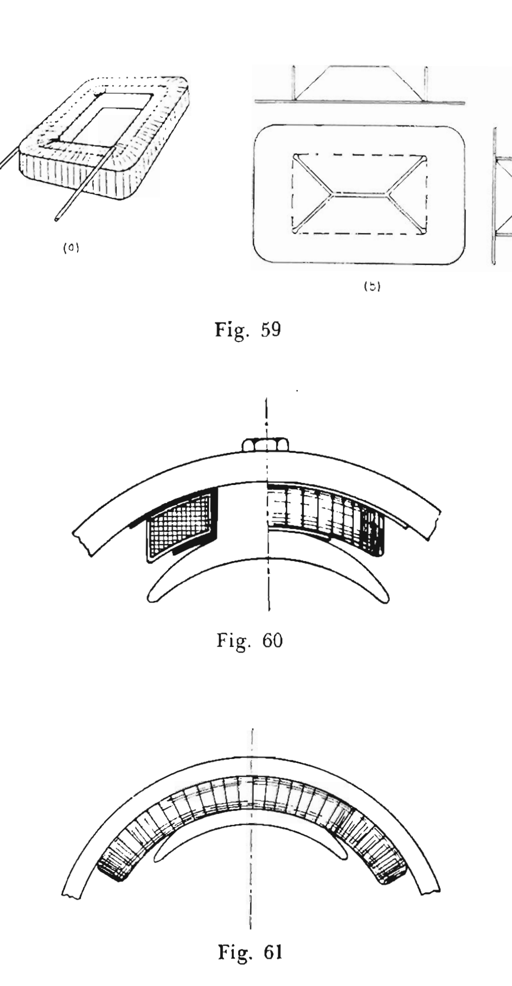


Fig. 59

Fig. 60

Fig. 61

mo por exemplo dínamos e motores de arranco de automóvel, as bobinas são montadas conforme indica a Fig. 61.

Em certos casos usam-se bobinas enroladas sobre carretéis, cuja forma está indicada na Fig. 62. Os carretéis são fabricados com diferentes materiais plásticos, possuidores de resistência mecânica e de bom poder isolante.

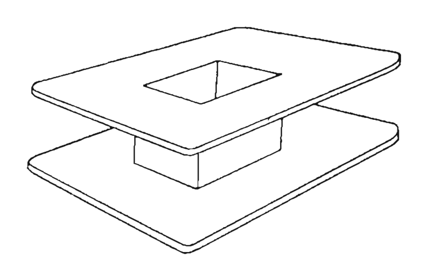


Fig. 62

A parte interna da bobina está sujeita a maior aquecimento que a externa e por isso nas bobinas das máquinas de elevada potência recorre-se à construção de seções concêntricas, conforme Fig. 63, ou à construção de seções em forma de discos agrupados em colunas, conforme Fig. 64. Tanto no caso das seções concêntricas, como no caso das seções em forma de discos, as mesmas são separadas por meio de prismas de madeira seca e envernizada.

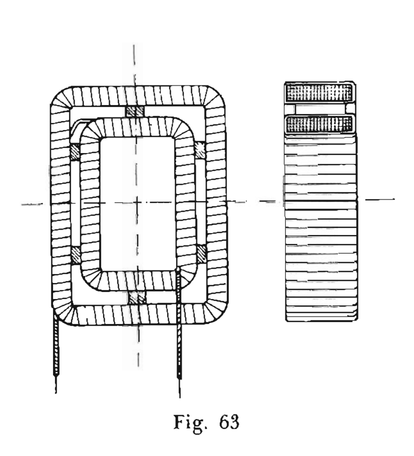


Fig. 63

Fig. 64

38 — Bobinas indutoras para excitação em série

As bobinas indutoras para excitação em série são percorridas

por correntes de elevada intensidade e por isso são fabricadas com condutores de grande seção, possuindo porém poucas espiras. Para seções até 12 ou 15 mm² usa-se o condutor circular. Para seções acima da indicada recorre-se ao emprego de condutor retangular, enrolado de lado ou de costa. O condutor retangular não deve ter isolamento próprio, pois este estraga-se no ato do enrolamento. O isolamento é obtido com fitas de fibra ou cartolina isolante colocadas junto ao condutor, quando este for enrolado de lado, conforme Fig. 65.

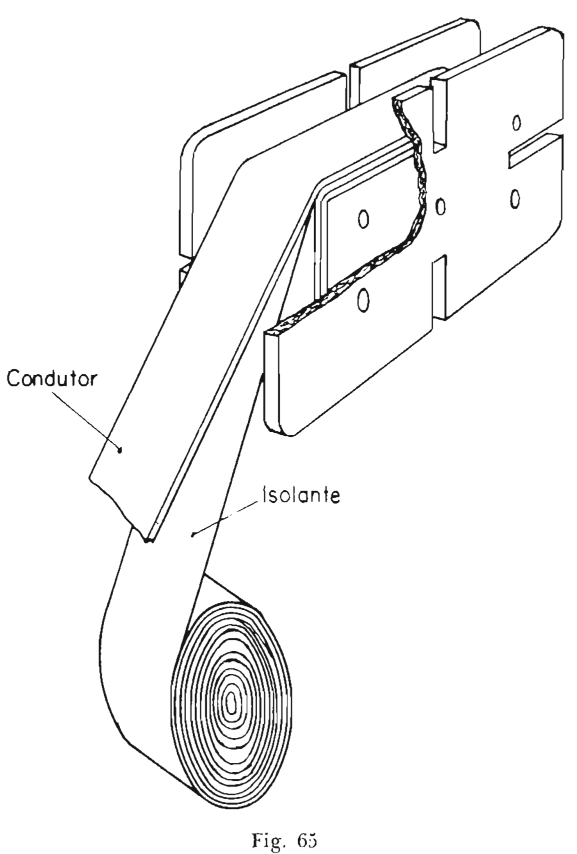


Fig. 65

Nas bobinas feitas com o condutor enrolado de lado ocorre que a saída do terminal interno cruza com as espiras, conforme Fig. 66, o que produz na bobina uma inchação incômoda, especialmente se a espessura do condutor for grande. Para evitar este inconveniente, constroem-se as bobinas em duas partes, enroladas em sentido contrário, conforme Fig. 67. Unindo os bornes internos, obtém-se a bobina com ambos os terminais externos.

Fig. 66

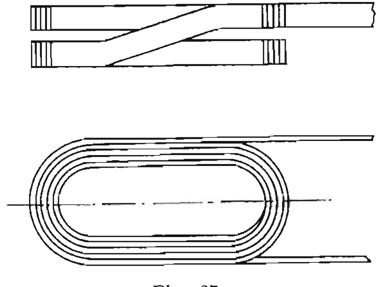


Fig. 67

A construção de bobinas feitas enrolando o condutor de costa requer formas especiais, muito resistentes. O condutor empregado nestas bobinas deve ser ligeiramente trapezoidal, para evitar que o estiramento da periferia externa provoque a diminuição da seção útil. O isolamento entre as espiras é obtido por diafragmas isolantes, cortados com a mesma forma e dimensões das espiras, conforme Fig. 68. Com este tipo de construção não há cruzamento das saídas com as espiras.

A Fig. 69 mostra o aspecto de uma bobina feita com condutor enrolado de costa, numa única camada. A Fig. 70 mostra a vista superior e inferior da bobina feita com condutor enrolado de costa, em duas camadas.

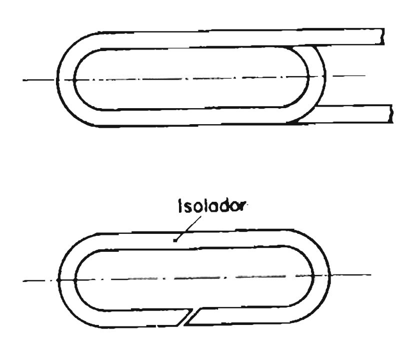


Fig. 68

Os critérios expostos para as bobinas de excitação em série valem também para as bobinas dos pólos auxiliares.

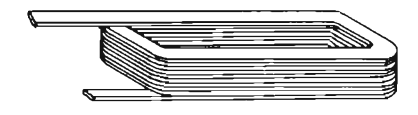
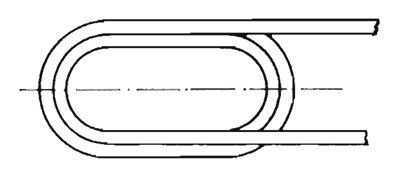


Fig. 69



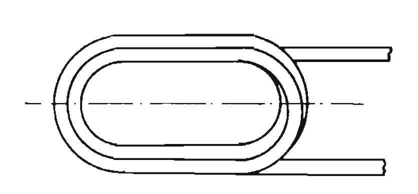


Fig. 70

39 – Bobinas indutoras para excitação composta

Nas máquinas de excitação composta, cada pólo possui duas

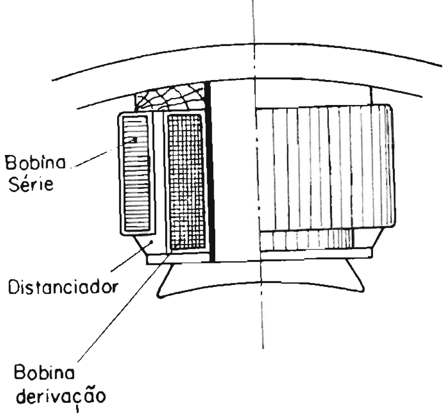


Fig. 71

bobinas distintas, fabricadas conforme os critérios antes expostos, uma das quais com muitas espiras de fio fino e a outra com poucas espiras de grande seção.

As duas bobinas podem ser dispostas em forma concêntrica, conforme Fig. 71, ou sobreposta, conforme Fig. 72.

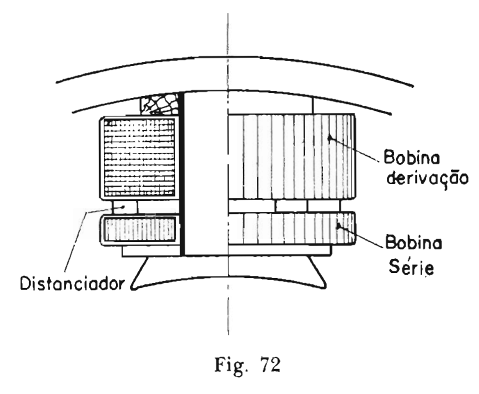


Fig. 72

Tanto na disposição da Fig. 71 como na da Fig. 72 é conveniente que entre as duas bobinas haja um espaço para facilitar a circulação de ar, necessário ao resfriamento.

40 – Ligação elétrica das bobinas de excitação

As bobinas dos diferentes pólos das máquinas elétricas são agrupadas geralmente em série entre si, observando-se a polaridade que as mesmas devem criar. Assim sendo, a ligação de duas bobinas é feita conforme Fig. 73 e a de quatro bobinas conforme Fig. 74.

Nas máquinas multipolares, no caso de se adotar a ligação das bobinas de excitação em dois circuitos paralelos, devem-se ligar as mesmas de forma que num circuito fiquem todos os pólos norte e no outro todos os pólos sul, conforme Fig. 75. Esta ligação permite que em caso de interrupção fiquem desligados todos os pólos do mesmo nome, o que não desequilibra mecanicamente o rotor.

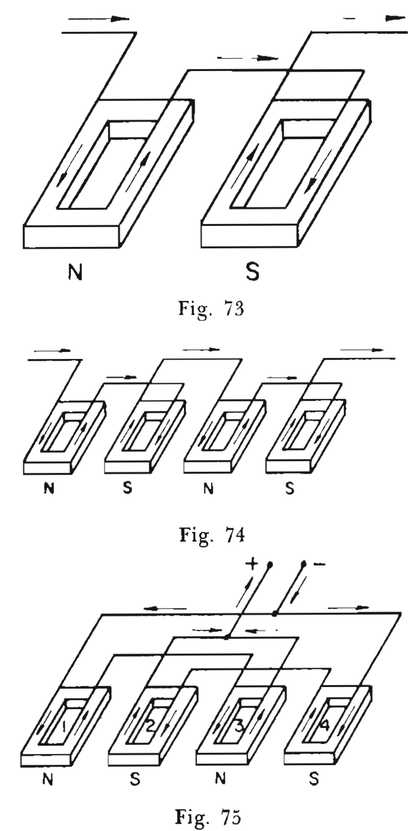


Fig. 73

Fig. 74

Fig. 75

No esquema da Fig. 75, interrompendo-se um dos circuitos, ficam desligados os dois pólos norte *1* e *3* ou os dois pólos sul *2* e *4*. A ligação das bobinas, conforme a Fig. 76, não deve ser feita, pois a interrupção de um dos circuitos acarreta o desligamento de um dos dois pares de pólos *1 e 2* ou *3 e 4*. Supondo-se por exemplo a exclusão dos pólos *1* e *2*, ficam ativos os pólos *3 e 4*, os quais, sendo de nome contrário, atuam como um poderoso eletroímã, atraindo o induzido no sentido da força *F*, conforme Fig. 77. A atração dos pólos *3 e 4* é elevada, pois elevada é a indução no entreferro e elevada é a área das expansões polares. Assim sendo, a atuação da força *F* sobre o rotor pode provocar a flexão do mesmo, fazendo-o roçar nas expansões polares, provocando estragos na armadura rotórica e nas expansões polares.

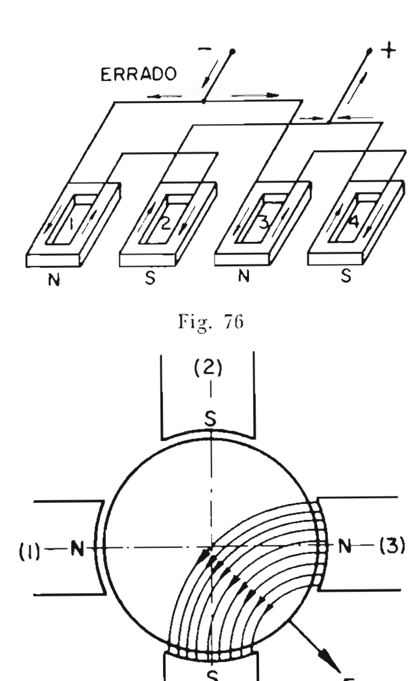


Fig. 76

Fig. 77

CAPÍTULO IV

41 — Funcionamento do dínamo a vazio

Quando um dínamo funciona sem alimentar um circuito utilizador, nenhuma corrente é por ele fornecida e diz-se que o mesmo trabalha a vazio.

Os dínamos com excitação separada, em paralelo e *compound* resultam excitados no funcionamento a vazio, apresentando em seus bornes uma diferença de potencial chamada tensão a vazio.

Os dínamos de excitação em série, com circuito aberto, não fornecem corrente alguma e por isso não resultam excitados, sendo nula a diferença de potencial em seus bornes.

No funcionamento a vazio, sendo nula a queda de tensão do gerador, a diferença de potencial existente em seus bornes corresponde à f.e.m. gerada no induzido, isto é,

$$V_0 = E$$

A f.e.m. produzida a vazio depende do fluxo indutor, do número de rotações do induzido, do número dos pólos e do número dos condutores em cada via interna do induzido. O número das vias internas depende do tipo de enrolamento, e em certos casos do número de pólos da máquina.

A) *Enrolamento bipolar* ($2a = 2$; $2p = 2$) — Nos dínamos bipolares, com enrolamento ondulado ou imbricado simples, há 2 vias internas, por isso a f.e.m. resultante, medível nas escovas, é a soma das f.e.m. médias que se geram em metade dos condutores induzidos, isto é: $N_a = N/2$, resultando:

$$E = e_m \cdot N_a = e_m \cdot \frac{N}{2}$$

onde e_m representa o valor médio da f.e.m. que se gera em cada condutor em correspondência a uma variação de fluxo. Tendo o dínamo 2 pólos, uma variação de fluxo completa se processa em meia rotação, ou seja no tempo expresso em segundos por:

$$t = \frac{1}{2\, n_0}$$

onde n_o representa o número de rotações por segundo da máquina. (A relação $1/n_o$ representa o tempo em segundos necessário a uma rotação do induzido.)

A f.e.m. média em cada condutor resulta:

$$e_m = 10^{-8} \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = 10^{-8} \frac{\phi}{\frac{1}{2\, n_o}} = 10^{-8} \cdot 2 \cdot n_o \cdot \phi$$

A f.e.m. resultante entre as escovas do dínamo será:

$$E = e_m \cdot N_a = e_m \frac{N}{2} = 10^{-8} \cdot n_o \cdot \phi \cdot N$$

ou também:

$$E = 10^{-8} \cdot \frac{n \cdot \phi \cdot N}{60}$$

indicando com *n* o número de rotações por minuto do induzido.

B) *Enrolamento multipolar ondulado* (2a = 2) — Neste tipo de induzido o número de condutores em cada via interna resulta $N_a = N/2$.

O tempo necessário para os condutores induzidos sofrerem uma variação de fluxo depende do número de pólos. Uma variação de fluxo se processa na fração de rotação 1/2p, onde *p* representa o número de pares de pólo e *2p* o número de pólos da máquina. Assim sendo, o tempo em segundos necessário ao processamento de uma variação de fluxo resulta: $\Delta t = 1/2p \cdot n_o$

A f.e.m. média de um condutor resulta:

$$e_m = 10^{-8} \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = 10^{-8} \frac{\phi}{\frac{1}{2p \cdot n_o}} = 10^{-8} \cdot 2 \cdot p \cdot n_o \cdot \phi$$

A f.e.m. total resulta:

$$E = e_m \cdot N_a = 10^{-8} \cdot 2 \cdot p \cdot n_o \cdot \phi \cdot \frac{N}{2} = 10^{-8} \cdot n_o \cdot \phi \cdot N \cdot p$$

ou também:

$$E = 10^{-8} \frac{n \cdot \phi \cdot N}{60} \cdot p$$

onde *n* representa o número de rotações por minuto da máquina.

C) *Enrolamento multipolar imbricado* ($2a = 2p$) — Neste tipo de induzido, o número de condutores em cada via interna resulta $N_a = N/2a$.

O tempo em segundos necessário para cada condutor sofrer uma variação de fluxo resulta: $\Delta t = 1/2 \cdot p \cdot n_o$.

A f.e.m. média de um condutor resulta:

$$e_m = 10^{-8} \cdot 2 \cdot p \cdot n_o \cdot \phi$$

A f.e.m. total é dada por:

$$E = e_m \; N_a = 10^{-8} \cdot 2 \cdot p \cdot n_o \cdot \phi \cdot \frac{N}{2a} = 10^{-8} \cdot n_o \cdot \phi \cdot N$$

ou também:

$$E = 10^{-8} \cdot \frac{n \cdot \phi \cdot N}{60}$$

onde *n* representa o número de rotações por minuto do induzido.

Esta fórmula é idêntica à das máquinas bipolares, o que é compreensível, pois na máquina multipolar com $2a = 2p$ cada via interna tem um número de condutores *p* vezes menor que a máquina bipolar. A variação de fluxo no caso da máquina multipolar processa-se, entretanto, num tempo *p* vezes menor, resultando a f.e.m. com o mesmo valor.

D) *Enrolamento multipolar paralelo com circuitos múltiplos* ($2a > 2p$) — Neste tipo de enrolamento o número de condutores em cada via interna resulta $N_a = N/2a$.

O tempo, em segundos, necessário para cada condutor sofrer uma variação de fluxo resulta: $\Delta t = 1/2p \cdot n_o$.

A f.e.m. média induzida em cada condutor resulta:

$$e_m = 10^{-8} \cdot 2 \cdot p \cdot n_o \cdot \phi$$

A f.e.m. total é dada por:

$$E = e_m \cdot N_a = 10^{-8} \cdot 2 \cdot p \cdot n_o \cdot \phi \cdot \frac{N}{2a} = 10^{-8} \cdot n_o \cdot \phi \cdot N \cdot \frac{p}{a}$$

ou também:

$$E = 10^{-8} \; \frac{n \cdot \phi \cdot N \cdot}{60} \cdot \frac{p}{a}$$

onde *n* representa o número de rotações por minuto do induzido.

42 — Fórmula geral da f.e.m. de um dínamo

Do que foi observado no parágrafo precedente é possível deduzir que a f.e.m. produzida no enrolamento induzido dos dínamos pode ser calculada pela seguinte fórmula geral:

$$E_v = 10^{-8} \frac{n \cdot \phi \cdot N}{60} \frac{p}{a}$$

Substituindo-se em p e a os valores relativos aos vários tipos de induzidos de máquinas bipolares e multipolares, obter-se-ão novamente as fórmulas do parágrafo precedente.

Enrolamento bipolar	$p = 1;\ a = 1$	; $E = 10^{-8} \dfrac{n \cdot \phi \cdot N}{60}$
Enrolamento multipolar ondulado	$a = 1;\ p > a$	; $E = 10^{-8} \dfrac{n \cdot \phi \cdot N}{60} \cdot p$
Enrolamento multipolar imbricado	$a = p$	; $E = 10^{-8} \dfrac{n \cdot \phi \cdot N}{60}$
Enrolamento multipolar imbricado com circuitos múltiplos	$a > p$	; $E = 10^{-8} \dfrac{n \cdot \phi \cdot N}{60} \dfrac{1}{a}$
Enrolamento multipolar série-paralelo	$a \neq p$	; $E = 10^{-8} \dfrac{n \cdot \phi \cdot N}{60} \dfrac{p}{a}$

43 — Cálculo do fluxo e das ampère-espiras no funcionamento a vazio

Geralmente o problema se apresenta de forma que os dados são: a f.e.m. *E;* o número dos condutores do induzido *N;* o tipo de enrolamento (2a); o número dos pólos *2p;* o número das rotações por minuto *n*. Com estes dados é possível calcular-se o fluxo que deve ser gerado em cada circuito magnético do induzido, o que é feito pela relação:

$$\phi = 10^{8} \frac{E \cdot 60}{n \cdot N} \frac{a}{p}$$

O valor da f.e.m. *E* é dado pela relação:

$$E = V + r_i I + \Delta V + \Delta V'$$

onde *V* é o valor da tensão que deve existir nos bornes da máquina quando esta funciona com carga normal; $r_i I$ é o valor da queda de ten-

são interna do induzido; Δ V é o valor da queda de tensão que se verifica no contato entre escovas e comutador e Δ V' é a queda de tensão que se verifica nos enrolamentos de excitação em série e nos pólos auxiliares. Em geral a queda de tensão total é aproximadamente de 5% da tensão *V*, isto é, $E = \sim 1{,}05 \cdot V$.

Calculado o valor do fluxo, conhecidas as dimensões dos vários trechos do circuito magnético e o respectivo material, pode-se calcular o número das ampère-espiras necessárias, usando-se o esquema de cálculo indicado no livro *Eletrotécnica*.

O cálculo das ampère-espiras magnetizantes processa-se mais facilmente quando se usa o esquema do circuito magnético indicado na Fig. 78, agrupados os valores na tabela da Fig. 79.

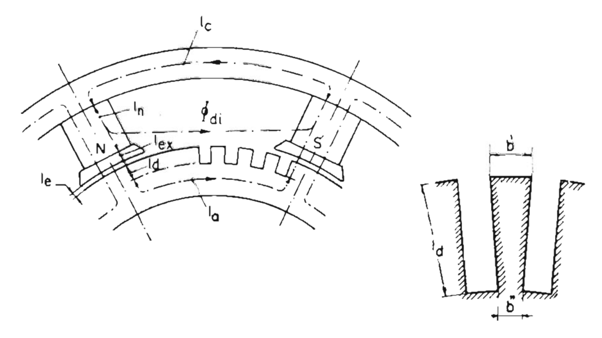


Fig. 78

Trecho e natureza do material	*Fluxo Maxwell*	*Seção cm²*	*Indução gauss*	*A.e.c.*	*Comprim. cm*	*Amp. espiras parciais*
Carcaça ( )	$\phi_N/2$	S_c	B_c	Aec_c	l_c	NI_c
Núcleo ( )	ϕ_N	S_N	B_N	Aec_N	$2 \cdot l_N$	NI_N
Expansão ( )	$\frac{\phi_N + \phi_e}{2}$	S_{ex}	B_{ex}	Aec_{exp}	$2 \cdot l_{ex}$	NI_{ex}
Entreferro (ar)	ϕ_e	S_e	B_e	$0{,}8B_e$	l_e	NI_e
Dentes (Fe lam)	$\phi_d = \phi_e$	S_d	B_d	Aec_d	$2 \cdot l_d$	NI_d
Armadura (Fe lam)	$\phi_e/2$	S_a	B_a	Aec_a	l_a	NI_a

Aet =

Fig. 79

As ampère-espiras totais, obtidas pela tabela da Fig. 79, representam as ampère-espiras necessárias a cada circuito magnético. Portanto, em cada pólo deve ser colocado um número de ampère-espiras que resulta de

$$Aep = \frac{Aet}{2}$$

Vale a pena lembrar que em virtude da dispersão magnética o fluxo no núcleo é maior que o do entreferro. Por esta razão a avaliação do fluxo na carcaça e no núcleo deve ser feita tomando em consideração o coeficiente de dispersão, o qual varia entre 1,1 e 1,25, ou seja:

$$\phi_N = (1{,}1 \text{ até } 1{,}25)\ \phi_e \text{ e } \phi_c = \phi_N/2$$

44 — Perdas no ferro

Conforme foi observado no livro *Eletrotécnica,* Capítulo X, todas as vezes que um núcleo de ferro for sujeito a variações de fluxo magnético produzem-se no mesmo fenômenos dissipativos da energia, comumente chamados de perdas no ferro. Estes fenômenos dissipativos de energia compõem-se de:

a) Perdas por correntes parasitas.

b) Perdas por histerese magnética.

a) *Perdas por correntes parasitas* — Em qualquer massa metálica, sujeita a variações de fluxo, geram-se f.e.m. que produzem, dentro da própria massa condutora, correntes intensas, chamadas correntes parasitas.

Estas correntes produzem uma força magnetomotriz que, pela lei de LENZ, se opõe à causa que a produz, isto é, ao movimento. Assim sendo, o efeito destas correntes constitui uma perda de potência. A fim de se reduzir esta perda de potência, é necessário construir o induzido com lâminas de ferro isoladas entre si. Com esta construção, o valor da f.e.m. induzida em cada lâmina é pequeno e atuará sobre um circuito elétrico de pequena seção, o que reduz consideravelmente o valor das correntes parasitas e a correspondente perda de potência.

A perda de potência produzida pelas correntes parasitas é expressa em watts, pela seguinte equação:

$$W_p = 10^{-12}\ \frac{\pi^2}{8\rho} \cdot B_M^2 \cdot f^2 \cdot \delta^2 \cdot l \cdot S$$

onde

ρ é a resistividade do material das lâminas, em microohms-centímetro.

B_M é o valor máximo da indução nas lâminas.

f é a freqüência da variação do fluxo.

δ é a espessura em mm das lâminas.

Esta equação resulta simplificada quando a perda é referida a 1 kg de lâminas, pois a mesma transforma-se em:

$$W_p = p_p \left(\delta \cdot \frac{f}{50} \cdot \frac{B_M}{10\,000} \right)^2$$

p_p é um coeficiente que depende do material, cujos valores estão indicados na tabela da Fig. 80.

A fórmula acima escrita fornece a perda específica de potência, devida às correntes parasitas, expressa em watts por quilo (W/kg) de lâminas.

b) *Perdas por histerese magnética* – Conforme foi visto no livro *Eletrotécnica,* Capítulo X, qualquer núcleo magnético, sujeito a magnetizar-se entre dois valores extremos $+ B_M$ e $- B_M$, percorre um ciclo de histerese todas as vezes que o campo magnetizante varia de $+ B_M$ para $- B_M$ e deste novamente para $+ B_M$. A perda de potência que se verifica é proporcional à área do ciclo. Esta perda é interpretada como sendo necessária para vencer os atritos entre os magnetos elementares de que o núcleo é composto, sendo chamada de *perda por histerese magnética.*

Nos geradores em geral, esta perda deve ser compensada com uma despesa de energia por parte do motor de acionamento.

Nos dínamos esta perda deve ser interpretada como sendo devida à formação de polaridades magnéticas induzidas em atraso com relação aos pólos indutores. Este atraso gera uma torção contrária ao movimento que tende a frear a máquina e que deve ser vencida pelo motor de acionamento, à custa de uma energia mecânica igual em valor à perda por histerese magnética.

A potência em watts perdida por efeito de histerese pode ser calculada pela fórmula de STEINMETZ.

$$W_h = 10^{-7} \cdot \mu \cdot B_M^{1,6} \cdot f \cdot v$$

onde B_M representa o valor máximo da indução existente no núcleo; *f* a freqüência de variação do fluxo expressa em ciclos por segundo ($f = n . p/60$); *v* é o volume do material expresso em centímetros cúbicos; μ é o coeficiente de STEINMETZ que depende da natureza do material.

A fórmula acima simplifica-se quando referida a 1 kg de lâminas, pois transforma-se em:

$$w_h = p_h \frac{f}{50} \left(\frac{B_M}{10\,000} \right)^{1,6} \text{para } B_M < 10\,000$$

$$w_h = p_h \frac{f}{50} \left(\frac{B_M}{10\,000} \right)^{2} \text{para } B_M > 10\,000$$

Esta fórmula fornece a perda específica de potência por histerese magnética, em watts por quilo (W/kg) de lâminas.

A fórmula de STEINMETZ é empírica e o expoente 1,6 representa o fenômeno com suficiente aproximação somente pelos valores de B_M inferiores a 10 000 gauss. Para valores de B_M superiores a 10 000 gauss o valor do expoente aproxima-se de 2.

O coeficiente p_h depende do material e seu valor está indicado na tabela da Fig. 80.

Perdas específicas totais no ferro — A perda específica total no ferro é dada pela soma das perdas específicas devidas às correntes parasitas e histerese magnética, podendo ser expressa pela seguinte fórmula:

$$w_{Fe} = w_p + w_h = P_p \left(\delta \frac{f}{50} \frac{B_M}{10\,000} \right)^2 + p_h \cdot \frac{f}{50} \left(\frac{B_M}{10\,000} \right)^2$$

A tabela da Fig. 80 indica os coeficientes p_p e p_h e as perdas específicas totais (W/kg_{10}) relativas a vários tipos de lâminas para a freqüência $f = 50$ Hz; $B_M = 10\,000$ gauss e espessura $\delta = 0,5$ mm.

Na equação acima escrita, pondo em evidência o fator

$$\left(\frac{B_M}{10\,000} \right)^2$$

obtém-se:

$$w_{Fe} = \left[p_p \left(\delta \frac{f}{50} \right)^2 + P_h \frac{f}{50} \right] \left(\frac{B_M}{10\,000} \right)^2$$

Se a freqüência for constante, por exemplo $f = 50$, substituindo os valores de p_p e p_h da tabela da Fig. 80, por exemplo das lâminas normais com espessura $\delta = 0,5$ mm, obtém-se:

$$w_{Fe} = \left[4,8 \left(0,5 \frac{50}{50} \right)^2 + 2,4 \frac{50}{50} \right] \left(\frac{B_M}{10\,000} \right)^2 = 3,6 \left(\frac{B_M}{10\,000} \right)^2$$

Pondo $B_M = 10\,000$ resulta $W_{Fe} = 3,6$ W/kg.

O valor 3,6 representa portanto a perda específica em W/kg que se verifica nas lâminas de ferro normal com espessura $\delta = 0,5$ mm, quando sujeitas a um campo magnético alternado com $B_M = 10\,000$ e $f = 50$ Hz. Este valor é o representado na tabela da Fig. 80 (W/kg_{10}).

Do exposto resulta que para freqüência constante e indução variável a perda específica, nas lâminas de ferro com espessura $\delta = 0,5$ mm, para diferentes valores da indução, pode ser calculada usando-se a fórmula seguinte:

$$w_{Fe} = W/kg_{10} \left(\frac{B_M}{10\,000} \right)^2$$

Os valores de W/kg_{10}, para os diferentes tipos de lâminas, estão indicados na tabela da Fig. 80.

Conhecendo-se o peso do ferro em kg, a perda no núcleo é fornecida por

$$W_{Fe} = w_{Fe} \cdot kg$$

Nas lâminas que sofrem processo de usinagem apreciável, as perdas são maiores que as calculadas pela fórmula acima mencionada. Tais lâminas são as dos induzidos das máquinas elétricas. A compressão destas lâminas nas carcaças estatóricas ou rotóricas estabelece curtos-circuitos periféricos que contribuem para aumentar as perdas nas mesmas.

Pelas razões expostas, tratando-se de núcleos laminados de induzidos de máquinas elétricas, as perdas no ferro, calculadas com a fórmula acima escrita, devem ser aumentadas de 25%, resultando:

$$W_{Fe} = 1{,}25 \cdot w_{Fe} \cdot kg$$

Em geral, os fabricantes de lâminas destinadas às máquinas elétricas fornecem a perda específica total no ferro em W/kg, referida à freqüência de 50 ou 60 Hz e à indução máxima de $B_M = 10\,000$ gauss. Com esta indicação, aplicando-se as fórmulas antes escritas é possível calcular-se a perda específica no ferro para qualquer condição de funcionamento.

Qualidade das lâminas	W/kg_{10} *por* $f = 50$ *Hz;* $S = 0{,}5$ *mm;* $B_M = 10\,000$	p_p	p_h
Lâminas normais	3,6	4,8	2,4
Lâminas com pouco Si	3	2,6	2,3
Lâminas com muito Si	1,7	1,1	1,4

Fig. 80

A fim de mostrar como variam as perdas específicas totais nas lâminas normais com espessura $\delta = 0{,}5$ mm, observam-se os valores da tabela da Fig. 81 ou as correspondentes curvas do diagrama da Fig. 82.

Perdas específicas W/kg das lâminas normais com espessura δ = 0,5 mm

B	f = 5	f = 10	f = 15	f = 20	f = 30	f = 40	f = 50	f = 60	f = 80
2000	—	—	—	0,05	0,07	0,11	0,15	0,18	0,25
4000	—	0,08	0,13	0,18	0,30	0,43	0,58	0,74	1,00
6000	—	0,19	0,30	0,42	0,67	0,97	1,30	1,66	2,27
8000	0,16	0,34	0,53	0,74	1,20	1,72	2,30	3,00	4,04
10000	0,25	0,53	0,83	1,15	1,87	2,67	3,60	4,61	6,31
12000	0,36	0,76	1,19	1,66	2,70	3,87	5,20	6,64	9,09
14000	0,49	1,03	1,62	2,22	3,67	5,26	7,00	9,03	—
16000	0,65	1,35	2,12	2,95	4,79	6,88	9,2	—	—
18000	0,82	1,72	2,68	3,73	6,06	8,71	—	—	—
20000	1,00	2,11	3,31	4,61	7,49	—	—	—	—
22000	1,22	2,56	4,00	5,58	9,06	—	—	—	—

Fig. 81

45 — Perdas no circuito de excitação

As perdas de excitação são as que se verificam por efeito joule no circuito de excitação da máquina. Estas perdas são proporcionais à resistência total R_e (bobinas e reostato) do circuito de excitação e ao quadrado da corrente de campo, sendo expressas por:

$$W_e = R_e \cdot i^2$$

46 — Perdas mecânicas

As perdas mecânicas são devidas aos atritos nos suportes e à ventilação. Por isso dependem do tipo dos suportes, dos processos de lubrificação dos sistemas de ventilação e da velocidade de rotação da máquina. O cálculo das mesmas é difícil e complexo, por isso costuma-se avaliá-las em frações da potência total da máquina, em função da velocidade de rotação da mesma. Ditas frações estão indicadas na tabela da Fig. 83.

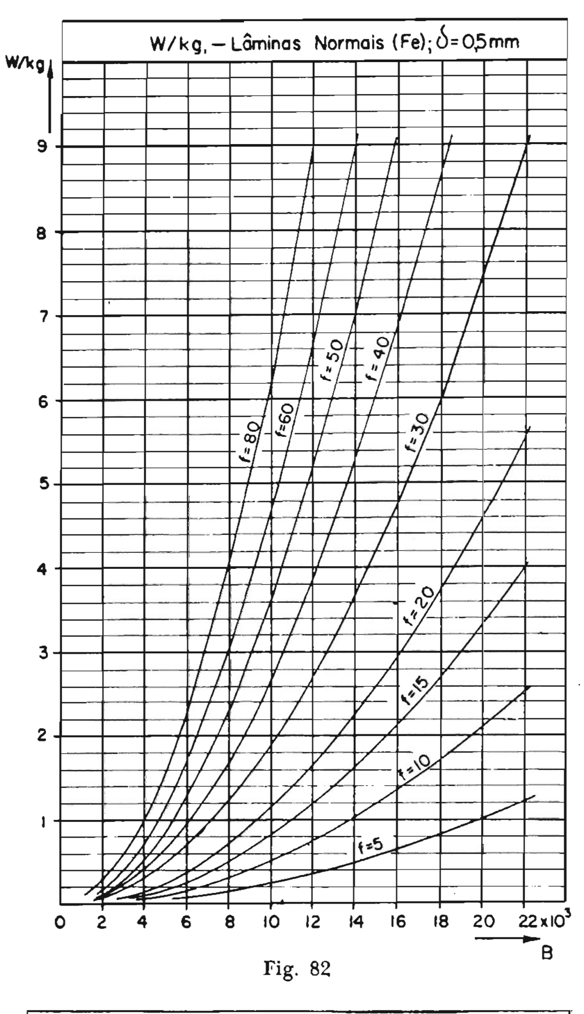


Fig. 82

PERDAS POR ATRITO NO AR E NOS SUPORTES	
Velocidade periférica m/seg	*Frações de potência total*
10	0,002
20	0,004
30	0,006
40	0,009
50	0,012
60	0,017

Fig. 83

As perdas por ventilação não são computadas para efeito de aquecimento.

Exercício

Calcular as perdas no ferro e as perdas mecânicas de um dínamo sabendo que:

Diâmetro externo do induzido	$D = 110$ cm
Diâmetro interno das lâminas	$d_i = 85$ cm
Altura do dente	$h = 4{,}2$ cm
Espessura média do dente	$b = 0{,}9$ cm
Comprimento magnético do induzido	$L_m = 23{,}4$ cm
Lâminas de ferro normal	$\delta = 0{,}5$ cm
Número de dentes	$Z = 180$
Indução na armadura	$B_a = 12\,600$
Indução nos dentes	$B_d = 21\,000$
Rotações por minuto	$n = 300$
Potência da máquina	$kW \simeq 220$
Número de pólos	$2p = 12$
Velocidade periférica	$v = 17{,}27$ m/seg.

A freqüência da variação do fluxo resulta:

$$f = \frac{p \cdot n}{60} = \frac{6 \cdot 300}{60} = 30 \text{ Hz}$$

A perda específica na armadura e nos dentes é dada pela tabela da Fig. 81 ou pelo diagrama da Fig. 82, resultando:

Perda específica na armadura $= \sim 3{,}2$ W/kg.
Perda específica nos dentes $= \sim 8{,}28$ W/kg.

O diâmetro externo da armadura resulta:

$$D_e = D - 2h = 110 - 2 \cdot 4{,}2 = 101{,}6 \text{ cm}$$

A superfície da coroa é $S_c = \frac{\pi}{4}(D_e^2 - d_i^2) = \frac{\pi}{4}(101{,}6^2 - 85^2) =$
$= 2432 \text{ cm}^2$

O volume da coroa da armadura resulta:

$$V_c = S_c \cdot L_m = 2432 \cdot 23{,}4 = 56\,909 \text{ cm}^3 = \sim 57 \text{ dm}^3$$

O peso da coroa da armadura é:

$$P_c = 57 \cdot 7{,}8 = 445 \text{ kg}$$

A perda em watt na coroa rotórica resulta:

$$W_c = 445 \cdot 3{,}2 = 1424 \text{ watts}$$

Volume dos dentes:

$$V_1 = b \cdot h \cdot Z \cdot L_m = 0{,}9 \cdot 4{,}2 \cdot 180 \cdot 23{,}4 = 15\,921 \text{ cm}^3 = 16 \text{ dm}^3$$

Peso dos dentes: $16 \cdot 7{,}8 = \sim 125$ kg.

Perdas nos dentes: $W_d = 125 \cdot 8{,}28 = 1035$ watts

A perda total no ferro do induzido resulta:

$$W = 1{,}25\,(W_c + W_d) = 1{,}25\,(1424 + 1035) = 3073 \text{ watts}$$

As perdas mecânicas são calculadas com o auxílio da tabela da Fig. 83, da qual resulta que para $v = 17{,}27$ m/seg o fator de perda é 0,0036.

Perdas mecânicas $= 0{,}0036 \cdot 220 = 0{,}792$ kW $= 792$ watts.

CAPÍTULO V

47 — Reação do induzido

O funcionamento do dínamo com carga processa-se quando o mesmo alimenta um circuito externo. Nestas condições, os condutores induzidos são atravessados por correntes, produzindo um campo magnético próprio, chamado campo magnético induzido.

Este campo magnético induzido, agindo sobre o campo magnético indutor, cria determinados fenômenos, aos quais dá-se o nome de reação do induzido.

O exame destes dois campos e sua composição permite entender a configuração do campo resultante e seus efeitos sobre o funcionamento da máquina.

A Fig. 84 (a) representa o enrolamento de um dínamo bipolar, funcionando a vazio. Os condutores induzidos possuem f.e.m., mas não corrente. O único campo magnético existente é o indutor, que é uniformemente distribuído.

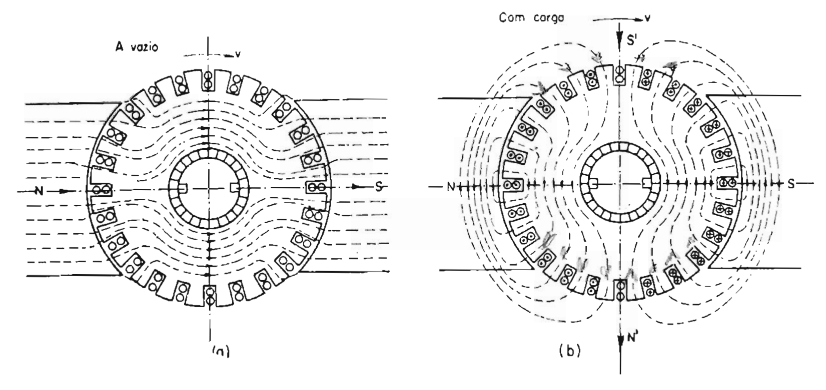


Fig. 84

A Fig. 84 (b) representa o induzido em regime de carga, isto é, com os condutores percorridos por corrente. O conjunto de condutores induzidos com corrente atua como um eletroímã, cuja polaridade, determinada por uma das regras indicadas no livro *Eletrotécnica,* parágrafo 82, apresenta-se conforme indica a figura. As linhas de força do campo indu-

zido (N'S') desenvolvem-se, no ferro, transversalmente às do campo indutor e por isso o campo magnético induzido é chamado também de campo transversal.

Os pólos N' e S' do campo magnético induzido resultam em atraso, com respeito à rotação, com os pólos indutores. Por esta razão os pólos indutores agem sobre os induzidos com ações contrárias ao movimento, isto é, produzindo uma torção resistente que tende a frear a máquina.

48 — Efeitos do campo transversal

a) *Torção do campo magnético* — Do exposto no parágrafo precedente, conclui-se que o dínamo, funcionando com carga, possui dois campos magnéticos distintos que se sobrepõem. O campo magnético induzido resulta deslocado em atraso com respeito ao campo indutor de 90° magnéticos.

Assim sendo a distribuição dos fluxos magnéticos pode ser representada conforme Figs. 85 (a), (b) e (c). Se o dínamo funciona a vazio o fluxo existente no entreferro é o produzido pelos pólos indutores; sua distribuição é simétrica, sendo representada pela curva *Ho* da Fig. 85 (a).

Quando o dínamo funciona com carga, a corrente que atravessa os condutores induzidos produz o fluxo de 90° magnéticos em atraso com respeito ao primeiro. Este fluxo é o representado pela curva *R* da Fig. 85 (b).

A depressão central da curva *R* corresponde às espiras localizadas na proximidade do plano de inversão, as quais, sendo curto-circuitadas pelas escovas, não produzem campo magnético.

A composição destes dois campos fornece o campo resultante, que é o representado na Fig. 85 (c) pela curva *H*. Vê-se claramente que o campo resultante é um campo deformado, apresentando maior intensidade nos *bicos polares de saída* e menor intensidade nos *bicos polares de entrada,* dos pólos indutores.

Chama-se bico polar de saída a extremidade da expansão polar indutora, através da qual os condutores induzidos abandonam o pólo. Bico polar de entrada é a extremidade da expansão polar indutora, através da qual os condutores induzidos entram embaixo do pólo.

A distribuição do campo resultante pode ser representada conforme indica a Fig. 86, em que fica evidente o fenômeno da distorção do campo resultante.

A distorção do campo resultante traz como conseqüência o deslocamento do plano de inversão da posição inicial *YY* para a final *Y'Y'*.

As escovas, a fim de aproveitarem o máximo valor das f.e.m. dos condutores induzidos, deverão estar em contato com as lâminas do comutador ligadas aos condutores do plano de inversão. Tendo-se verificado um deslocamento do plano de inversão magnética, mantendo-

se as escovas na posição inicial indicada na figura, obter-se-ia um enfraquecimento da f.e.m. aproveitável.

A f.e.m. total, além do enfraquecimento descrito, sofre uma ulterior diminuição, pois o fluxo total, distorcido, é inferior ao existente no funcionamento a vazio. A diminuição do campo distorcido é devida aos diferentes estados da saturação magnética dos elementos da máquina, pois o acréscimo de fluxo que se verifica nos bicos polares de saída não chega a compensar a diminuição que se processa nos respectivos bicos polares de entrada. Pelo exposto é compreensível que o enfraquecimento do campo resultante seja tanto mais acentuado quanto maior for o grau de saturação do circuito magnético da máquina.

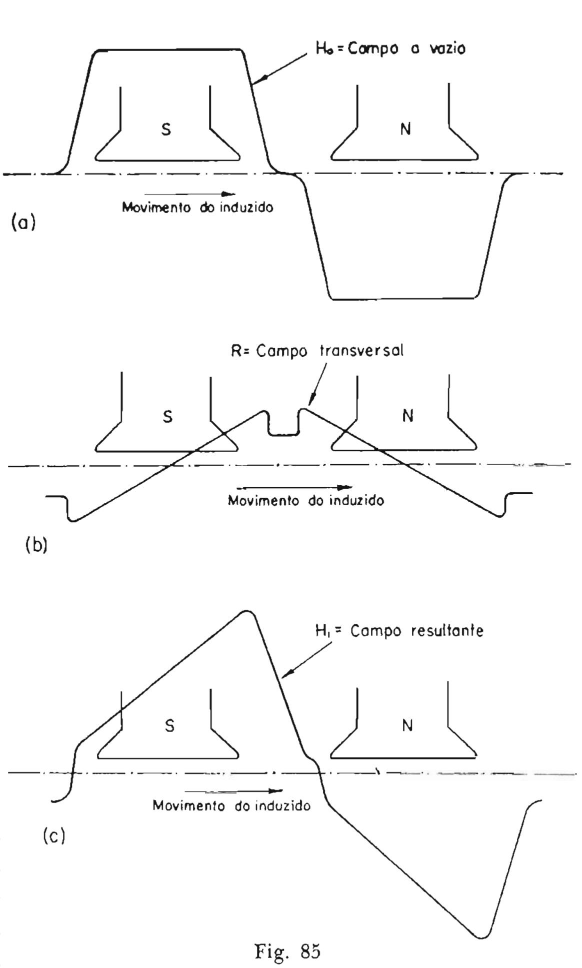


Fig. 85

A reação do induzido manifesta-se com uma distorção do campo magnético da máquina e um enfraquecimento do mesmo. Ambos os efeitos traduzem-se numa acentuada diminuição da diferença de potencial existente nas escovas.

b) *Efeito desmagnetizante provocado pelo deslocamento das escovas* — Foi visto no parágrafo precedente que por efeito da reação do induzido processa-se o deslocamento do plano de inversão da máquina. Desejando-se obter o máximo aproveitamento possível das f.e.m. induzidas,

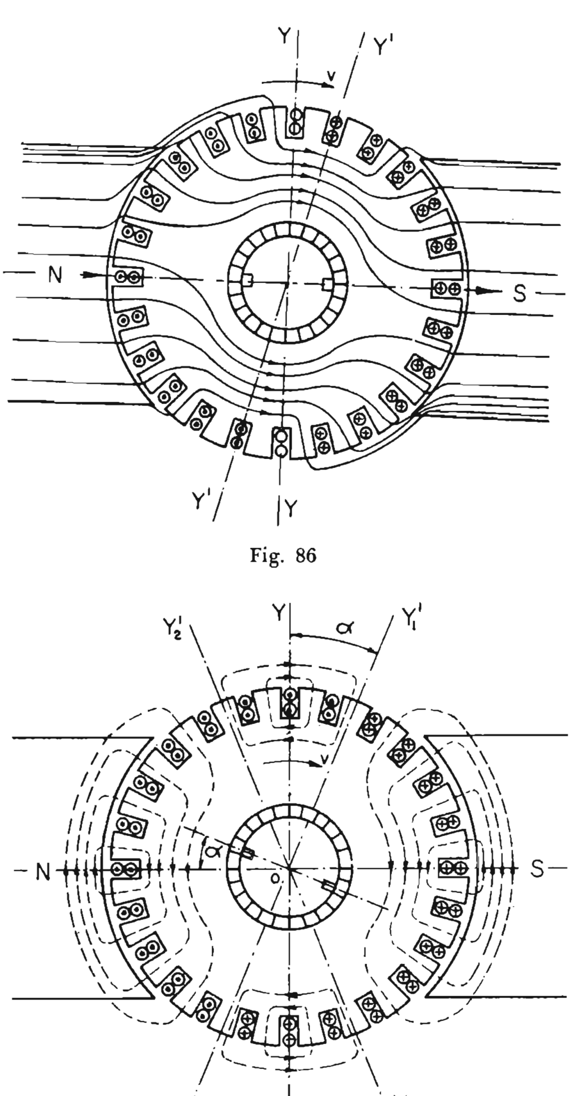


Fig. 86

Fig. 87

as escovas devem ser deslocadas da sua posição inicial, para poderem ficar em correspondência com o novo plano de inversão.

Supondo-se que as escovas sejam deslocadas do ângulo a, conforme Fig. 87, no sentido da rotação, a corrente nos condutores induzidos adquire a distribuição indicada na figura.

Esta distribuição permite dividir os condutores induzidos em quatro grupos, pelos planos $Y_1Y'_1$ e$Y_2Y'_2$.

Os planos mencionados estão deslocados do plano YY do ângulo a respectivamente no sentido e em sentido contrário ao da rotação, sendo o ângulo a igual ao ângulo do deslocamento das escovas.

Os dois grupos de condutores, colocados embaixo dos pólos, produzem um campo transversal, idêntico ao examinado na Fig. 84 (b).

Os outros dois grupos, localizados na zona interpolar, produzem um campo em sentido contrário ao campo indutor. Os efeitos deste campo contrário são de enfraquecimento do fluxo, portanto, desmagnetizantes. Por esta razão as ampère-espiras produzidas pelos condutores compreendidos entre os ângulos $Y_1\hat{O}Y_2$ e $Y'_1\hat{O}Y'_2$ são chamadas ampère-espiras desmagnetizantes ou contrárias.

Do exposto conclui-se que quando as escovas são deslocadas no sentido da rotação, a reação do induzido, além de provocar a distorção do campo (devida ao campo transversal), provoca, também, uma desmagnetização (devida ao campo contrário).

A distorção e o enfraquecimento do campo magnético têm como conseqüência a diminuição da diferença de potencial existente nas escovas. Esta diminuição é tanto mais acentuada quanto maior for a corrente no induzido e o ângulo de deslocamento das escovas.

49 — Cálculo das ampère-espiras de reação do induzido das máquinas com pólos auxiliares

Mantendo as escovas em correspondência com o plano de inversão, todas as ampère-espiras do induzido terão efeito de distorção do fluxo. A avaliação destas ampère-espiras é importante para que medidas apropriadas sejam tomadas a fim de eliminar seus efeitos.

O efeito da reação do induzido pode ser neutralizado por dois processos distintos, ou seja, por meio de pólos auxiliares, ou interpolos, e por meio de acréscimo das ampère-espiras magnetizantes, dos pólos principais.

O processo dos pólos auxiliares visa à neutralização do campo magnético induzido, transversal por meio de pólos colocados na zona intermediária dos pólos principais da máquina, conforme Fig. 88.

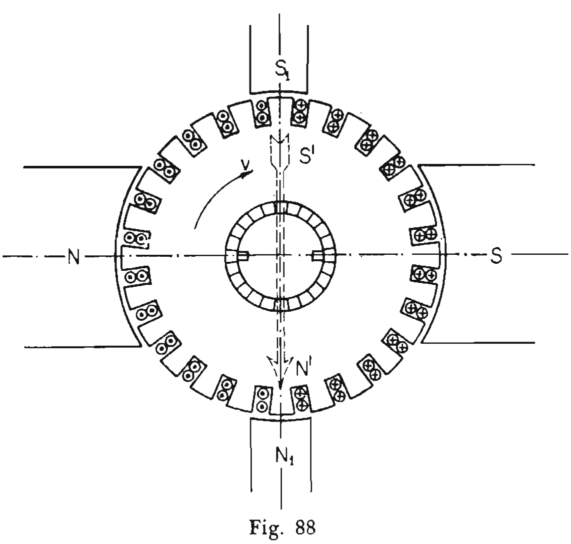


Fig. 88

Para se eliminarem os efeitos do campo induzido, a polaridade dos pólos auxiliares deve ser tal que na frente do pólo *N'* induzido resulte o pólo auxiliar com polaridade N_1 e na frente da extremidade polar induzida *S'*, o pólo auxiliar S_1. Assim sendo, cada pólo auxiliar tem o mesmo nome do pólo principal que o segue na rotação.

Para que os pólos auxiliares possam eliminar totalmente o efeito da reação transversal do induzido, permitindo colocar as escovas exatamente em correspondência com o plano de inversão magnética, é necessário que cada par deles possua o mesmo número de ampère-espiras produzido por reação do induzido em cada circuito magnético da máquina.

Sendo a reação do induzido proporcional à sua corrente, os pólos auxiliares, para poder neutralizá-la, devem ser alimentados pela própria corrente da máquina, isto é, em série. Cada pólo auxiliar deverá possuir a metade das ampère-espiras de reação do induzido, relativas a cada circuito magnético.

As ampère-espiras de reação em cada circuito magnético podem ser calculadas por vários processos, sendo os mais usados os seguintes:

a) *Por meio do número total das espiras induzidas da máquina*

por pares de pólos: $$2\times = \frac{N_{esp} \cdot I_a}{p}$$

por pólo $$\times = \frac{N_{esp} \cdot I_a}{2p}$$

onde $2\times$ é o número de ampère-espiras por circuito magnético, ou seja, por cada par de pólos; N_{esp} é o número total de espiras do induzido; I_a é a intensidade da corrente em cada via interna do induzido e $2p$ o número de pólos da máquina.

b) *Por meio do número de lâminas no comutador* — Se em correspondência com cada pólo existem $Z_p = Z/2p$ lâminas no comutador, e se $N_z = N_{esp}/Z$ é o número de espiras compreendido entre duas lâminas do comutador, resulta:

por pares de pólos: $2\times = 2Z_p \cdot N_z \cdot I_a$

por pólo $\times = Z_p \cdot N_z \cdot I_a$

Substituindo-se em Z_p e em N_z os seus valores, encontrar-se-ão novamente as fórmulas do item (a).

c) *Por meio da "densidade linear periférica" do induzido* — A densidade linear periférica do induzido (A) representa a quantidade de "ampère-condutores" que existem em cada centímetro de periferia do induzido. Se verá mais adiante que este fator é muito importante no aproveitamento elétrico da máquina. Conhecendo-se o valor de A, o número dos ampère-condutores por cada pólo resulta $A \cdot \tau_p$ onde τ_p é o passo polar expresso em centímetros. Conhecido o número de ampère-condutores por pólo, é possível obter-se o número de ampère-espiras

por cada pólo, pois $\times = \frac{A \cdot \tau_p}{2}$

Assim sendo resulta:

por pares de pólos: $2\times = A \cdot \tau_p$

50 — Cálculo das ampère-espiras de reação do induzido das máquinas sem pólos auxiliares

Quando a máquina não possui pólos auxiliares, as escovas estão deslocadas do plano de inversão e por conseguinte a reação do induzido manifesta-se através de dois efeitos distintos:

a) desmagnetizante ou longitudinal.
b) distorcente ou transversal.

Como estes dois efeitos manifestam-se de maneira distinta, é possível avaliá-los separadamente, a fim de neutralizá-los convenientemente.

a) *Cálculo das ampère-espiras desmagnetizantes* — O efeito desmagnetizante provocado pela reação do induzido depende das espiras compreendidas nos ângulos $Y_1\hat{O}Y_2$ e $Y'_1\hat{O}Y'_2$, conforme Fig. 87. Estas espiras dependem do ângulo 2α, ou seja, duplo ângulo de deslocamento das escovas.

Para cada par de pólos o número de lâminas do comutador compreendido neste duplo ângulo é *4b*, sendo *b* o número de lâminas do comutador do qual cada escova foi deslocada. Se N_z representa o número de espiras compreendido entre duas lâminas do comutador, o número de ampère-espiras desmagnetizantes por circuito magnético, da reação do induzido resulta:

por pares de pólos: $2 \times_c = 4 \cdot b \cdot N_Z \cdot I_a$

por pólo: $\times_c = 2 \cdot b \cdot N_Z \cdot I_a$

sendo I_a a corrente que circula em cada via interna do induzido.

Agindo as ampère-espiras $\times_c$ axialmente com as dos pólos indutores, sua compensação é feita acrescentando a cada um dos pólos o número de ampère-espiras igual a $\times_c$.

Variando as ampère-espiras de reação do induzido proporcionalmente com a corrente da máquina, é conveniente que a compensação das mesmas seja feita por bobina de excitação em série.

Desejando-se avaliar as ampère-espiras de reação do induzido, com base no fator A (ampère-condutores por centímetro de periferia do induzido), podem ser usadas as seguintes fórmulas:

por pares de pólos: $2 \times_c = 2 \cdot b_s \cdot A$

por pólo: $\times_c = b_s \cdot A$

onde b_s representa o arco da periferia do induzido que corresponde ao número de lâminas de que as escovas foram deslocadas. Indicando com $Z_p = Z/2p$ o número de lâminas por pólo e com *b* o número de

lâminas correspondentes ao deslocamento das escovas, o valor de b_s é obtido da seguinte proporção:

$$Z_p : \tau_p = b : b_s$$

de onde:

$$b_s = \frac{b \cdot \tau_p}{Z_p}$$

b) *Cálculo das ampère-espiras de reação transversal* — As ampère-espiras de reação transversal resultam da diferença entre as ampère-espiras totais de reação do induzido e as ampère-espiras desmagnetizantes. Em correspondência com cada pólo, o número das mesmas resulta:

$$X_t = X - X_c = Z_p \cdot N_z \cdot I_a - 2 \cdot b \cdot N_z \cdot I_a = (Z_p - 2b)\ N_z\ I_a$$

O fator $(Z_p - 2b)$ representa o número de lâminas do comutador que ficam em contato com as espiras que provocam a reação transversal.

O número das ampère-espiras X_t pode também ser obtido por:

$$X_t = \frac{A \cdot \tau_p}{2} - A \cdot b_s = A\ \left(\frac{\tau_p}{2} - b_s\right)$$

O efeito destas ampère-espiras tem como conseqüência a distorção e a diminuição do fluxo. A avaliação deste efeito é muito difícil, pois não se pode prever como estas ampère-espiras atuam sobre os bicos polares de entrada e de saída, que possuem diferentes graus de saturação.

Para a compensação das ampère-espiras transversais do induzido costuma-se adicionar aos pólos indutores principais um certo número de ampère-espiras, cujo valor está compreendido entre 20 e 30% do número das ampère-espiras transversais do induzido, calculadas com as fórmulas antes expostas. Escolhem-se os valores menores para máquinas com baixa indução nos pólos.

Como a reação transversal do induzido é proporcional à corrente que circula no mesmo, a compensação da mesma deverá ser feita por bobinas de excitação em série, que no caso em questão deverão ser montadas sobre os pólos principais da máquina.

Exercício 1

Um dínamo com pólos auxiliares possui as seguintes características:

Corrente absorvida	$I = 325$ ampères
Número de pólos	$2p = 4$
Tipo de enrolamento	Imbricado $2a = 2p$
Número de ranhuras	68
Lâminas do comutador	204
Os elementos são constituídos de:	1 espira
Diâmetro do induzido	$D = 43{,}5$ cm.

Calcular o número de ampère-espiras de cada pólo auxiliar, para neutralizar a reação do induzido.

Solução:

Tendo o dínamo pólos auxiliares, as escovas serão mantidas no plano de inversão e a reação é unicamente transversal.

O número de espiras é igual ao número de elementos e este é igual ao número de lâminas do coletor.

$$N_{esp} = Z = 204$$

Tendo o enrolamento induzido 4 vias internas, a corrente dos condutores resulta:

$$I_a = \frac{I}{2a} = \frac{325}{4} = 81{,}25 \text{ ampères}$$

O número de ampère-espiras que cada pólo auxiliar deve possuir é dado por:

$$X = \frac{N_{esp} \cdot I_a}{2p} = \frac{204 \cdot 81{,}25}{4} = \sim 4144$$

Este mesmo valor pode ser calculado em função das lâminas no comutador, pois em cada pólo resulta:

$$Z_p = \frac{Z}{2p} = \frac{204}{4} = 51$$

Entre uma lâmina e outra há somente uma espira, isto é, $N_z = 1$; resulta então

$$X = Z_p \cdot N_z \cdot I_a = 51 \cdot 81{,}25 = \sim 4144$$

Este mesmo valor pode ser calculado com base nos ampère-condutores por centímetros de periferia do induzido, pois resulta:

$$A = \frac{2 \cdot N_{esp} \cdot I_a}{\pi D} = \frac{2 \cdot 204 \cdot 81{,}25}{3{,}14 \cdot 43{,}5} = \frac{33150}{136{,}6} = 242{,}68$$

$$\tau_p = \frac{\pi D}{2p} = \frac{3{,}14 \cdot 43{,}5}{4} = 34{,}15 \text{ cm.}$$

$$X = \frac{A \cdot \tau_p}{2} = \frac{242{,}68 \cdot 34{,}15}{2} = \sim 4144$$

Exercício 2

Um dínamo sem pólos auxiliares possui as seguintes características:

Corrente absorvida	110 ampères
Número de pólos	$2p = 4$
Tipo de enrolamento	ondulado $2a = 2$
Número de ranhuras	$N_R = 33$
Lâminas do comutador	$Z = 65$
Os elementos são constituídos por:	$N_z = 1$ espira
Densidade superficial (ampère-condutor/cm)	$A = 142{,}7$
Deslocamento das escovas	$b = 3$ lâminas
Passo polar	$\tau_p = 11{,}38$ cm.

Calcular o número de ampère-espiras a ser acrescentado em cada pólo indutor para neutralizar a reação do induzido.

Solução:

a) *Ampère-espiras desmagnetizantes*

Sabendo-se que

$$N_z = 1; \; b = 3; \; I_a = \frac{100}{2} = 50;$$

o número de ampère-espiras de reação contrária por pólo resulta:

$$\times_c = 2 \cdot b \cdot N_z \cdot I_a = 2 \cdot 3 \cdot 50 = 300$$

Este número de ampère-espiras pode ser obtido, avaliando-se o arco polar correspondente a 3 lâminas do comutador, isto é:

$$b_s = \frac{b \cdot \tau_p}{Z_p} = \frac{3 \cdot 11{,}39}{65/4} = 2{,}1 \qquad \times_c = b_s \cdot A = 2{,}1 \cdot 142{,}7 = 300$$

A compensação do efeito desmagnetizante é feita adicionando-se a cada pólo principal 300 ampère-espiras.

b) *Ampère-espiras transversais*

$$\times_t = (Z_p - 2b) \; N_z \cdot I_a = (\frac{65}{4} - 2 \cdot 3) \cdot 50 = 512{,}5$$

ou também:

$$\times_t = A \; (\frac{\tau_p}{2} - b_s) = 142{,}7 \; (\frac{11{,}38}{2} - 2{,}1) = 512{,}5$$

Como a máquina não possui pólos auxiliares, a compensação total da reação transversal é feita acrescentando-se a cada pólo principal um número de ampère-espiras que varia entre 20 e 30% do valor das ampère-espiras de reação transversal.

Escolhendo-se 25% do valor acima calculado resulta que para compensar a reação transversal é preciso adicionar a cada pólo da máquina

$$512{,}5 \cdot 0{,}25 = 128 \text{ ampère-espiras}$$

O número de ampère-espiras a ser acrescentado a cada pólo da máquina para compensar totalmente a reação resulta:

$$300 + 128 = 428 \text{ ampère-espiras}$$

51 — Comutação

No dínamo com carga, as espiras do induzido, ao passar de um pólo para o outro, sofrem inversão de corrente, sendo ao mesmo tempo curto-circuitadas pelas escovas, pois estas estão em contato com mais de uma lâmina do comutador.

A inversão de corrente e o curto-circuito instantâneo das espiras provocam determinados fenômenos aos quais dá-se o nome de *comutação.*

É importante que a comutação se processe nas melhores condições possíveis, pois dela depende o bom funcionamento da máquina.

A fim de examinar-se os fenômenos da comutação, se verá o comportamento da espira *hm* (traçado grosso), nas três posições sucessivas representadas nas Figs. 89 (a), (b) e (c).

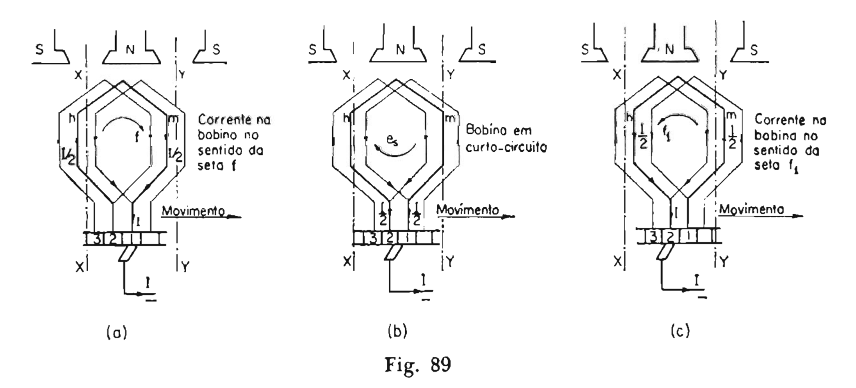


Fig. 89

No caso indicado na figura, para simplificar a explicação supõe-se a largura da escova igual à da lâmina do comutador.

Na posição (a) a espira ainda não alcançou a zona de comutação, o lado *h* encontra-se sob a influência do pólo sul e o lado *m* sob a influência do pólo norte. A escova se apóia sobre a lâmina 1, recebendo a cor-

rente I/2 do lado *m* da espira considerada e a corrente I/2 da espira adjacente. O valor da corrente na espira *hm* é I/2 e seu sentido é indicado pela seta *f*.

Deslocando-se o induzido para a direita, a espira *hm* encontrar-se-á na posição indicada na Fig. 89 (b), em que a escova se apóia simultaneamente sobre as escovas 1 e 2. A espira *hm* resulta curto-circuitada pela escova e seus lados encontram-se na zona de inversão. Nestas condições, na espira não há corrente alguma.

Continuando o deslocamento do induzido para a direita, a espira considerada alcança a posição indicada na Fig. 89 (c), na qual a mesma é atravessada novamente pela corrente I/2, circulando, porém, no sentido indicado pela f_1 que é contrário ao precedente, da posição (a).

Na passagem da posição (a) para a (c) a corrente, na espira, I/2 dirigida no sentido horário, anula-se para adquirir novamente valor I/2 no sentido anti-horário.

Na passagem da posição (a) para a (b), em virtude da variação da corrente de I/2 para zero, gera-se na espira uma f.e.m. que pela lei de LENZ tende a manter a corrente no circuito. Por isso esta f.e.m. tem o mesmo sentido da seta *f*. Na espira em curto-circuito a posição (b), atua na f.e.m., e_s chamada f.e.m. de reatância.

A f.e.m. da reatância e_s depende da indutância da espira, que é elevada por se tratar de espira enrolada sobre ferro, e do tempo em que se verifica a variação da corrente. A f.e.m. instantânea e_s lança na espira em curto-circuito uma corrente instantânea dirigida no mesmo sentido da f.e.m. Esta corrente com caráter instantâneo não provoca nenhum fenômeno especial, a não ser perda de energia.

Na passagem da posição (b) para a (c) a espira *hm* sofre a variação de corrente, do valor zero para I/2, dirigida no sentido anti-horário. Por efeito desta variação de corrente, gera-se na espira uma f.e.m. de reatância e_s, que pela lei de LENZ tende a opor-se à corrente e por isso o sentido de e_s é análogo ao anterior, isto é, horário.

Por efeito desta f.e.m., que se gera no instante em que a escova interrompe o curto-circuito da espira, produz-se uma faísca tanto mais intensa quanto maior for a corrente do induzido e a indutância da espira curto-circuitada.

A finalidade dos artifícios usados para se obter uma boa comutação é gerar na espira, no instante da interrupção do curto-circuito, uma f.e.m. e_c, igual e contrária a e_s, chamada f.e.m. da comutação.

Se a f.e.m. e_c de comutação for igual e contrária à f.e.m. de reatância e_s, anulam-se reciprocamente, não se processando a geração da faísca no instante da abertura do curto-circuito.

52 — Sistemas usados para melhorar a comutação

A fim de analisar como atuam os vários sistemas empregados para melhorar a comutação, examina-se a espira *hm* representada na Fig. 90, que reproduz a mesma espira da Fig. 89 (c), isto é, no instante da abertura do curto-circuito.

Foi visto que neste instante gera-se na espira uma f.e.m. e_s de reatância responsável pela faísca que se produz entre a lâmina abandonada e a escova.

O sentido da f.e.m. e_s é horário e por conseguinte o da f.e.m. e_c de comutação deverá ser anti-horário.

É possível gerar-se esta f.e.m. na espira se, no instante da abertura do curto-circuito, o condutor *h* encontra-se sob a influência do pólo Norte e o condutor *m* encontra-se sob a influência do pólo Sul.

Este resultado é alcançado colocando-se, em correspondência com as zonas interpolares, pólos de comutação N_1 e S_1, conforme Fig. 90.

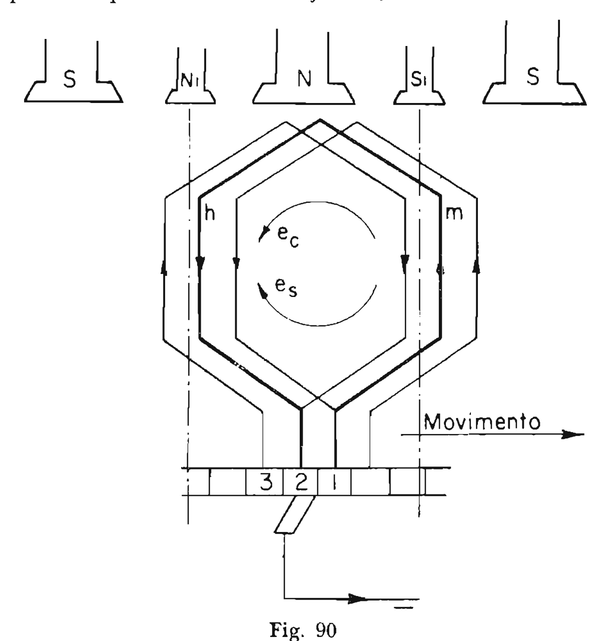


Fig. 90

Como é fácil observar, a polaridade de cada pólo de comutação é a mesma do pólo que o segue na rotação, isto é, corresponde à polaridade dos pólos auxiliares usados para neutralizar o efeito da reação transversal do induzido, conforme foi visto no parágrafo 49.

Os pólos auxiliares, que são em número igual ao dos principais, devem possuir um número de ampère-espiras totais, composto pelas ampère-espiras necessárias a neutralizar a reação do induzido e pelas

ampère-espiras necessárias a gerar nos condutores da espira em curto-circuito a f.e.m. e_c de comutação.

Dependendo o valor de e_s da corrente induzida, aquele varia ao variar a carga da máquina e sua compensação deve ser feita por ampère-espiras produzidas por excitação em série.

A alimentação dos pólos auxiliares é feita em série, conforme indica a Fig. 91.

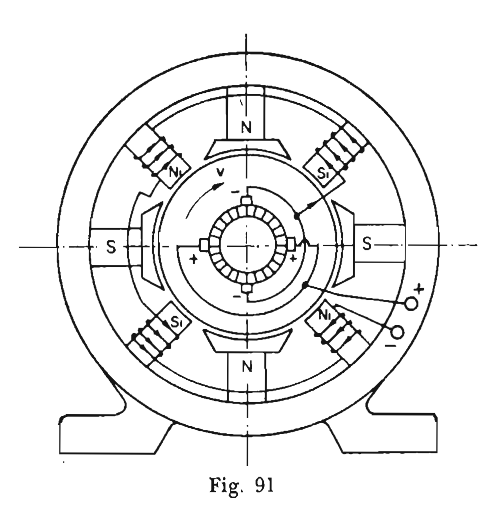


Fig. 91

Em alguns dínamos de velha construção, em lugar de pólos auxiliares usavam-se expansões polares com o bico de entrada saliente, conforme Fig. 92.

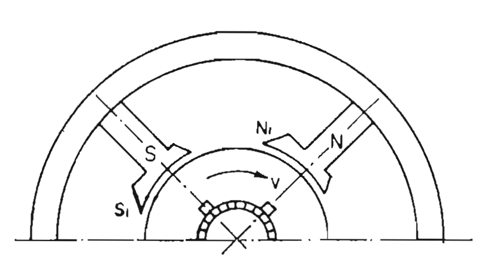


Fig. 92

O dispositivo mais usado, nas máquinas sem pólos auxiliares, é o que permite deslocar as escovas no sentido da rotação, conforme Fig. 93. Este dispositivo, que é usado somente nas máquinas de pequena potência, não permite a regulação automática ao variar a carga da máquina. O deslocamento das escovas é feito em geral por experimentação, com a máquina funcionando com carga normal.

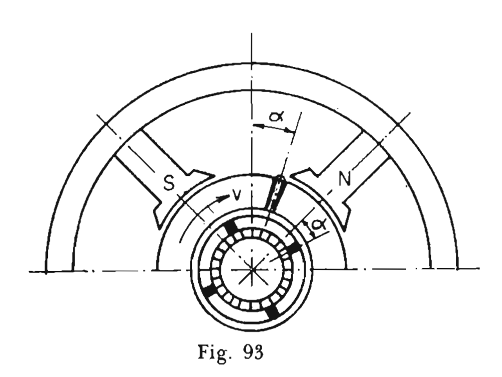


Fig. 93

53 — Enrolamentos compensadores

Os pólos auxiliares neutralizam o campo transversal do induzido, somente nas zonas de comutação. A distri-

buição desuniforme do fluxo no pólo e a concentração da indução no entreferro em correspondência com os bicos polares de saída não resultam modificadas. Esta distribuição desuniforme da indução no entreferro tem como conseqüência a geração de maior f.e.m. em algumas espiras e menor em outras. Pode então ocorrer que entre determinadas lâminas do comutador exista uma diferença de potencial bastante maior que a calculada matematicamente com a fórmula, existindo por isso o perigo das faíscas rotativas em volta do comutador.

Nas máquinas de grande potência, sujeitas a repentinas variações de carga, usa-se um dispositivo especial chamado enrolamento compensador, que tem a finalidade de suprimir a reação do induzido em toda a zona polar.

A eliminação total do campo induzido somente é possível por meio de um enrolamento que esteja, assim como o induzido, distribuído em toda a periferia do rotor. Por esta razão o enrolamento compensador está distribuído na periferia das expansões polares, o quanto mais próximo possível do entreferro.

A ligação dos condutores do enrolamento compensador relativa a um par de pólos é feita de forma que a corrente que os atravessa tenha sentido contrário ao da que atravessa os condutores induzidos embaixo do pólo correspondente.

Sendo a f.m.m. do induzido proporcional à corrente do mesmo, o enrolamento de compensação deve ser alimentado pela mesma corrente. Por isso deve ser conetado em série ao induzido, aos enrolamentos dos pólos auxiliares e ao circuito externo.

A Fig. 94 representa um dínamo com 4 pólos, provido de pólos auxiliares e enrolamentos compensadores.

Os enrolamentos compensadores anulam a reação do induzido embaixo da expansão polar e os pólos auxiliares a anulam na zona interpolar.

Os dínamos de alta rotação, como os acionados por turbina, possuem o rotor muito comprido e portanto comutação difícil e necessitam dos enrolamentos compensadores. Ou-

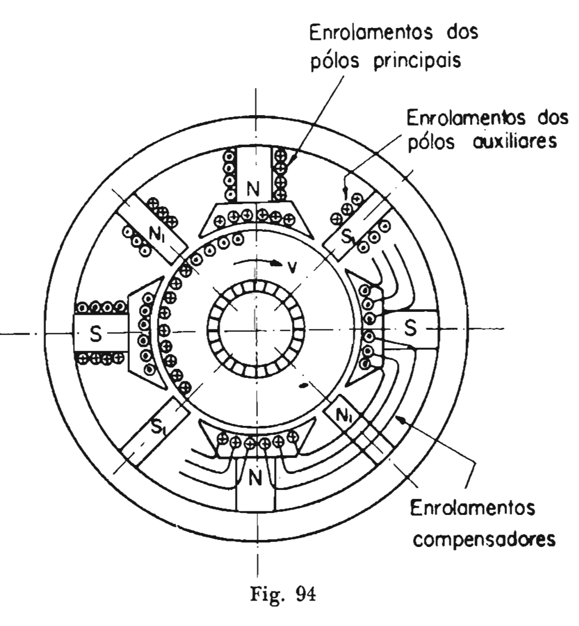


Fig. 94

tras máquinas que necessitam de enrolamentos compensadores são, como será visto mais tarde, os motores de grande potência sujeitos a grandes e repentinas mudanças de carga, como os destinados ao acionamento de laminadores.

54 — Cálculo da tensão de reatância

O valor instantâneo da f.e.m. de reatância na bobina curto-circuitada é:

$$e_s = L \frac{di}{dt}$$

O valor médio de $\frac{di}{dt}$, estendido a todo o período T_c de comutação, resulta: I/T_c ou $2I_a/T_c$, onde $2I_a$ representa a variação total da corrente na bobina, pois esta do valor $+ I_a$ varia para o valor $- I_a$.

O valor médio da f.e.m. de reatância resulta, em volts:

$$e_{sm} = L \frac{2I_a}{T_c}$$

O tempo T_c pode ser calculado com base no passo do comutador τ_c e da velocidade periférica deste v_c, ou então com base na velocidade periférica v do induzido e o arco b' que corresponde na periférica do induzido ao passo do comutador, conforme Fig. 95, pondo

$$T_c = \frac{b'}{v}$$

e substituindo este valor na fórmula da f.e.m. resulta:

$$e_{sm} = L \frac{2vI_a}{b'}$$

O valor do coeficiente de auto-indução da bobina curto-circuitada, se esta possuir N_z espiras, resulta:

$$L = \frac{N_z^2}{\Sigma R} \cdot 10^{-8} = N_z^2 \cdot 2 \cdot L_m \cdot K \cdot 10^{-8}$$

onde L_m é o comprimento magnético do induzido e K um coeficiente que varia entre 5 e 7. Substituindo-se este valor na fórmula da f.e.m., resulta:

$$e_m = \frac{N_z^2 \cdot 4 \cdot v \cdot I_a \cdot L_m \cdot K \cdot 10^{-8}}{b'}$$

Considerando-se a largura de uma escova igual ao passo ao coletor, verifica-se $2N_zI_a = A \cdot b'$ onde A representa o número dos "ampère-condutores por centímetro" da periferia do induzido. A igualdade acima escrita é baseada no fato de corresponder a cada lâmina do comutador N_zI_a ampère-espiras, isto é, $2N_zI_a$ ampère-condutores.

$$e_m = 2 \cdot N_z \cdot A \cdot v \cdot L \cdot K \cdot 10^{-8}$$

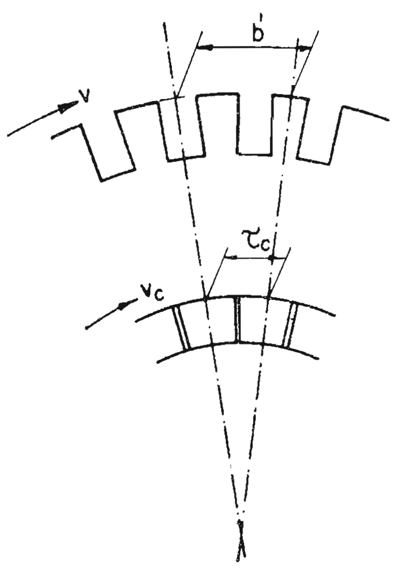


Fig. 95

Esta fórmula é válida também no caso da escova cobrir várias lâminas do coletor, como em geral acontece, sendo o aumento do tempo de comutação T_c compensado pelo aumento de coeficiente de auto-indução de cada bobina, pois aumenta o número de concatenamento das espiras com o fluxo.

Na fórmula acima escrita v é expresso em cm/seg., L_m em centímetros.

O valor da f.e.m. de reatância não deve ser superior a 5 volts, para que a comutação se processe normalmente. Em geral nas máquinas de construção normal este valor é da ordem de 2 ou 3 volts.

A fórmula antes escrita evidencia que as dificuldades da comutação aumentam com o aumentar do comprimento axial do induzido, com a velocidade periférica do induzido e com o número de espiras de que cada elemento do enrolamento é constituído.

55 — Exercício de aplicação

Calcular a tensão de reatância de um dínamo cujos dados são:

Diâmetro do induzido	D = 110 cm
Número de rotações por minuto	n = 300
Corrente total fornecida	I = 1300
Número de pólos	2p = 12
Enrolamento induzido imbricado	2a = 2p = 12
Comprimento magnético do induzido	L_m = 23,5 cm
Número de lâminas do comutador	Z = 360
Número de ranhuras	N_R = 180
Barras por ranhuras	n = 4

Solução:

A velocidade periférica de induzido será:

$$v = \frac{\pi D \cdot n}{60} = \frac{3,14 \cdot 110 \cdot 300}{60} = 1727 \text{ cm/seg.}$$

Número de elementos: $F = Z = 360$
Número de condutores: $N_c = 180 \cdot 4 = 720$

$$N_z = \frac{N_c/2}{F} = \frac{720/2}{360} = 1$$

Correntes em cada via interna:

$$I_a = \frac{I}{2a} = \frac{1300}{12} = 108 \text{ ampères}$$

Ampère-condutores por centímetro:

$$A = \frac{N_c \cdot I_a}{\pi \cdot D} = \frac{720 \cdot 108}{3,14 \cdot 110} = 225$$

De posse destes elementos e escolhendo $K = 6$, calcula-se a f.e.m. de reação que resulta:

$$e_s = 2 \cdot N_z \cdot A \cdot v \cdot L_m \cdot K \cdot 10^{-8} = 2 \cdot 1 \cdot 225 \cdot 1727 \cdot 23,5 \cdot 6 \cdot 10^{-8} = 1,1 \text{ volts}$$

56 — Dimensões dos pólos auxiliares

No parágrafo precedente foi visto que a f.e.m. de reatância, na bobina curto-circuitada pela escova, é expressa por:

$$e_s = 2N_z \cdot A \cdot v \cdot L_m \cdot K \cdot 10^{-8}$$

Esta f.e.m. é a causadora das faíscas que se estabelecem entre escova e lâminas do comutador. Para anular os efeitos nocivos desta f.e.m. é preciso gerar na bobina curto-circuitada uma f.e.m. e_c igual e contrária à primeira. Esta f.e.m. e_c, como foi visto, deve ser gerada pelos pólos auxiliares. Indicando-se com B_c a indução que cada pólo auxiliar deve produzir no seu entreferro e considerando o comprimento do pólo auxiliar igual ao do induzido, isto é, L_m, a f.e.m. e_c, conforme o livro *Eletrotécnica,* parágrafo 117, resulta:

$$e_c = 2 \cdot N_z \cdot B_c \cdot L_m \cdot v \cdot 10^{-8}$$

Devendo e_c resultar igual a e_s, igualando-se as duas expressões resulta:

$$B_c = K \cdot A$$

onde K, como foi dito, varia entre 5 e 7, resultando:

Para máquinas enroladas com fio

$$(N_z > 1); \; K = 6 \text{ ou } 7$$

Para máquinas enroladas com barras

$$(N_z = 1); \; K = 5 \text{ ou } 6$$

O valor de B_c é baixo, nunca excedendo de 4000 gauss.

A fim de que o fluxo dos pólos auxiliares resulte proporcional às ampère-espiras do induzido, para qualquer valor da carga, é necessário que o circuito magnético dos mesmos não esteja saturado. Esta é a razão pela qual se mantém baixo o valor da indução B_c.

Em geral o comprimento do pólo auxiliar é igual ao comprimento geométrico do induzido. É possível porém executá-lo com comprimento menor, devendo neste caso aumentar-se proporcionalmente a indução do entreferro do mesmo, de forma a não alterar a f.e.m. e_c que o mesmo deve gerar nos elementos curto-circuitados pelas escovas.

A largura da expansão dos pólos auxiliares deve ser igual à da zona periférica do induzido, que contém os condutores pertencentes às espiras curto-circuitadas pelas escovas. Esta largura é expressa por:

$$l_{ea} = l'_{es} + \left[\frac{m}{2} (1 + u) - \frac{a}{p} \right] \tau_c'$$

o valor $u = \frac{N_R}{2p} - \frac{Y_1}{m}$ ou então $= \frac{Y_1}{m} - \frac{N_R}{2p}$ conforme

$\frac{N_R}{2p}$ for maior ou menor que $\frac{Y_1}{m}$

onde:

l'_{es} = largura da escova referida à circunferência do induzido $= l_{es} \frac{D}{D_c}$

expressa em mm.

m = lados de elementos por ranhura.

N_R = número de ranhuras.

p = número de pares de pólos.

Y_1 = passo posterior do enrolamento em lados de elementos.

a = número de pares de vias internas do induzido.

τ'_c = passo ao comutador em mm, referido à circunferência do induzido

$$\tau'_c = \frac{D}{D_c} \cdot \tau_c$$

Determinadas as dimensões dos pólos auxiliares e o valor da indução B_c, determina-se o comprimento do entreferro embaixo do pólo auxiliar, que resulta:

Para máquinas de pequena e média potência, enroladas com fio ($N_z > 1$)

$$d_c = 2 \text{ a } 5 \text{ mm}$$

Para máquinas de média potência com enrolamento de barra ($N_c = 1$)

$$d_c = 4 \text{ a } 8 \text{ mm}$$

O número de ampère-espiras necessárias a magnetizar o entreferro e o circuito magnético do ferro, para que os pólos auxiliares possam produzir a indução B_c, pode ser feito conforme o esquema de cálculo indicado no livro *Eletrotécnica,* parágrafo 103. Entretanto, dado o baixo valor da indução B_c, o número de ampère-espiras relativas ao ferro resulta muito pequeno. Por isso o número das ampère-espiras necessárias NI_c para que cada pólo auxiliar possa gerar a f.e.m. e_c nas espiras curto-circuitadas é dado pela seguinte expressão:

$$NI_c = 1{,}4 \ 0{,}8 \cdot B_c \cdot d_c = 1{,}12 \cdot B_c \cdot d_c$$

57 — Excitação dos pólos auxiliares

Os pólos auxiliares têm a dupla finalidade de neutralizar as X_t ampère-espiras de reação transversal do induzido e gerar na zona de inversão a indução B_c capaz de gerar a f.e.m. e_c de comutação. Por esta razão o número de ampère-espiras necessárias a cada pólo auxiliar resulta:

$$NI_{au} = X_t + 1{,}12 \cdot B_c \cdot d_c$$

58 — Exercício de aplicação

Um dínamo possui as seguintes características:

Diâmetro do induzido	$D = 61$ cm
Número de ranhuras do induzido	$N_R = 79$
Lados de elementos por ranhuras	$m = 6$
Número de vias internas do induzido	$2a = 2$
Número de pólos	$2p = 6$
Ampère-condutores por centímetro	$A = 250$

Passo posterior do enrolamento	$Y_1 = 77$
Lâminas do comutador	$Z = 236$
Diâmetro do comutador	$D_c = 38$ cm
Passo do comutador	$\tau_c = 51$ mm
Largura da escova	$l_{es} = 19$ mm
Comprimento do entreferro do pólo auxiliar	$d_c = 0,5$ cm
Comprimento axial do pólo auxiliar	$L_{pa} = 23$ cm
Comprimento axial do induzido	$L = 23$ cm.

Calcular a largura da expansão polar do pólo auxiliar e o número de ampère-espiras necessárias para gerar a f.e.m. de comutação e_c.

Solução:

A largura da expansão polar do pólo auxiliar resulta:

$$l_{ae} = l'_{es} + \left[\frac{m}{2} (1 + u) - \frac{a}{p} \right] \tau_c'$$

$$\text{onde } u = \frac{N_R}{2p} - \frac{Y_1}{m} = \frac{79}{6} - \frac{77}{6} = 0,333$$

$$l_{ea} = 19 \frac{61}{38} + \left[\frac{6}{2} (1 + 0,333) - \frac{1}{3} \right] 5,1 \frac{61}{38} =$$

$$= 30,5 + 30 = 60,5 \text{ mm} \sim 6 \text{ cm}$$

Considerando-se $K = 5,5$, a indução no entreferro do pólo auxiliar resulta:

$$B_c = K \cdot A = 5,5 \cdot 250 = 1375$$

As ampère-espiras necessárias para criar a f.e.m. e_c nas escovas curto-circuitadas resultam:

$$NI_c = 1,12 \cdot B_c \cdot d_c = 1,12 \cdot 1375 \cdot 0,5 = 770$$

59 – Escolha da densidade de corrente no induzido e no indutor – Perdas específicas no cobre

Conhecida a potência W e a tensão V do dínamo, a intensidade da corrente que o mesmo fornece a um circuito externo é dada por:

$$I = \frac{W}{V}$$

A intensidade da corrente nos condutores induzidos depende do tipo de enrolamento, resultando:

$$I_a = \frac{I}{2a}$$

onde *2a* representa o número de vias internas do induzido.

A seção *S* do condutor determina-se depois de ter fixado o valor da densidade de corrente, o qual depende da elevação de temperatura admissível, da potência da máquina, da sobrecarga máxima e do sistema de ventilação.

Uma densidade de corrente baixa proporciona à máquina um bom rendimento e limitadas quedas de tensão, mas aumenta o custo de fabricação da mesma.

Densidades de corrente com elevado valor permitem reduzir o volume da máquina, mas são responsáveis pelo acréscimo das perdas no cobre, do aquecimento e das quedas de tensão.

A escolha da densidade de corrente deve, portanto, ser feita tomando-se em consideração o custo da máquina e o bom funcionamento da mesma. No induzido, quanto maior for a velocidade periférica, tanto mais eficiente será sua ventilação e por conseguinte sua refrigeração.

Para o primeiro cálculo de proporcionamento da máquina, o valor da densidade de corrente no induzido pode ser escolhido com base nos valores indicados na tabela da Fig. 96.

Para as bobinas dos pólos principais, a densidade de corrente deve ser escolhida entre 1,2 e 2,5 amp./mm². Se porém estas bobinas forem fabricadas em forma de discos ou tubos com canais de ventilação, o valor da densidade de corrente pode ser mantido mais elevado, ou seja, compreendido entre 2 e 3,5 amp./mm².

Velocidade periférica no induzido m/seg	*Densidade de corrente A/mm²*
5	3,4
10	3,7
15	4,1
20	4,5
25	4,8
30	5,1
35	5,4
40	5,7
45	5,8
50	5,9

Fig. 96

Nos pólos auxiliares a densidade de corrente pode ser considerada dentro dos valores-limites 2,5 e 4 amp./mm². Uma vez estabelecida a densidade de corrente, calcula-se a seção dos condutores, que resulta:

$$S = \frac{I}{\delta}$$

Determinada a seção dos condutores, calcula-se a resistência do induzido, conforme foi indicado no parágrafo 26. Conhecido o valor da resistência do induzido, é possível calcular-se a queda de tensão e as perdas por efeito joule, conforme foi visto no parágrafo 27.

As perdas por efeito joule podem também ser calculadas por meio da perda específica em watts por quilo (W/kg), usando-se a fórmula:

$$W_{cu} = W/kg \cdot P_{cu} = w_{cu} \cdot P_{cu}$$

As perdas por efeito joule, num condutor com comprimento de l m e seção de S mm², são expressas por:

$$W_{cu} = I^2R = I^2 \cdot \frac{\rho \cdot l}{S}$$

O peso de um condutor de cobre, cujo comprimento é l m e cuja seção é S mm², resulta expresso em kg pela seguinte fórmula:

$$P_{cu} = 8{,}9 \cdot l \cdot S \cdot 10^{-3}$$

O fator 8,9 representa o peso específico do cobre. A perda específica do cobre resulta:

$$w_{cu} = \frac{W_{cu}}{P_{cu}} = \frac{I^2 \cdot \rho \cdot l}{S \cdot 8{,}9 \cdot l \cdot S \cdot 10^{-3}} =$$

$$= \frac{I^2}{S^2} \cdot \frac{\rho}{8{,}9} \cdot 10^{-3} = \delta^2 \frac{\rho}{8{,}9} \cdot 10^{-3} \text{ watt/kg}$$

onde:

δ = densidade de corrente em amp./mm²

ρ = resistividade, que para o cobre a 75°C resulta igual a 0,0216 ohms/m//mm². Substituindo-se este valor na fórmula antes escrita, resulta:

$$w_{cu} = 2{,}43 \cdot \delta^2 \text{ (watts/kg)}$$

de onde

$$W_{cu} = 2{,}43 \cdot \delta^2 \cdot P_{cu}$$

60 — Aquecimento do induzido

Em todas as partes de uma máquina elétrica onde se verificam perdas, geram-se calorias, as quais produzem uma elevação de temperatura.

Por efeito desta elevação de temperatura, cria-se um desequilíbrio térmico entre a parte aquecida e o ambiente, transmitindo-se para o ar uma parte das calorias produzidas. A temperatura deixa de elevar-se quando o número de calorias fornecidas ao ar é igual ao número de calorias produzidas pelas perdas.

A transmissão de calorias para o ar processa-se com maior facilidade aumentando-se a superfície de irradiação e a ventilação a que dita superfície está sujeita.

Do exposto resulta que a elevação de temperatura a que um elemento de máquina elétrica está sujeito é diretamente proporcional às perdas que nele se produzem e inversamente proporcional à superfície de irradiação do calor, dependendo ainda do material de que o elemento de máquina é constituído e das condições de ventilação. Nas máquinas de construção normal a ventilação é proporcional à velocidade periférica do induzido.

A relação entre a potência perdida total em watts e a superfície de irradiação (W/S) fornece a quantidade de watts perdidos que correspondem a uma unidade de superfície de irradiação. Esta relação caracteriza o aquecimento do elemento considerado. Por tal razão, não deve exceder determinados valores, como será visto a seguir.

A fim de facilitar a irradiação de calor produzido no induzido, constrói-se o mesmo com canais de ventilação. Tais canais resultam eficientes quando distanciados de 8 ou 10 cm um do outro, tendo espessura de 1 cm.

O efeito de irradiação dos canais de ventilação não é tão eficiente como as superfícies cilíndricas externas e internas do induzido, pois o isolamento elétrico interposto entre uma lâmina e a outra atua também como isolamento térmico, dificultando a condutividade térmica no sentido axial do induzido. Por esta razão, para efeito de irradiação do calor, considera-se somente uma das superfícies de cada canal de ventilação.

Assim sendo, no cálculo da superfície de irradiação do induzido, considerando-se:

— Superfície externa do núcleo induzido $= \pi \cdot D \cdot L$ (m^2)

— Superfície interna do núcleo induzido $= \pi \cdot di \cdot L$ "

— Superfícies frontais do núcleo induzido $= \dfrac{\pi}{4}(D^2 - d_i^2) \cdot 2$ "

— Superfícies dos canais de ventilação $= \dfrac{\pi}{4}(D^2 - d_i^2) \cdot c$ "

onde *L* representa o comprimento geométrico do induzido e *c* o número dos canais de ventilação. Somando-se os vários membros, resulta:

$$S = \pi L \ (D + d_i) + \frac{\pi}{4} \ (D^2 - d_i^2) \ (c + 2) \text{ expressa em m}^2$$

Usa-se o comprimento geométrico em substituição ao magnético, para tomar em consideração o fato de que uma boa parte das perdas por efeito joule se produzem e se dispersam fora da carcaça do induzido.

Conhecida a superfície de irradiação, pode-se calcular a quantidade de watts que devem ser irradiados por cada metro quadrado, isto é, W/m^2, através da fórmula:

$$W/m^2 = \frac{\text{Perdas no ferro} + \text{Perdas no cobre}}{\text{Superfície de irradiação}} = \frac{W_{Fe} + W_{cu}}{S}$$

Conhecido o fator W/m^2, é suficiente avaliar a velocidade periférica $v = \pi . D . n/60$ em metros por segundo, para se ter o meio de avaliar o aquecimento do induzido.

A tabela da Fig. 97 fornece, em função da velocidade periférica do induzido, os valores de W/m^2 necessários para provocar a sobrelevação de temperatura de 1°C.

A elevação de temperatura do induzido é dada por:

COEFICIENTE DE ADUÇÃO		
v = m/seg	*Máquinas bem ventiladas W/m²/°C*	*Máquinas mal ventiladas W/m²/°C*
5	42,50	27,80
10	55,00	37,00
15	67,50	46,30
20	80,00	55,50
25	95,00	64,80
30	111,00	73,80

Fig. 97

$$\Delta T = \frac{W/m^2}{K}$$

A elevação de temperatura pode ser calculada também pela seguinte fórmula:

$$T = q \ \frac{W/m^2}{(1 + 0{,}1 \cdot v) \ 10\,000}$$

onde q é um coeficiente que para máquinas bem ventiladas deve ser considerado igual a 360, enquanto que para máquinas mal ventiladas deve ser considerado 540, e v é a velocidade periférica do rotor expressa em m/seg.

Por ser o isolamento do induzido constituído de algodão impregnado ou não, a elevação de temperatura no mesmo não pode exceder de 40°C ou 55°C, conforme está explicado no parágrafo seguinte.

61 — Classes de isolamento e máximas elevações de temperatura admissíveis no induzido

Os condutores empregados nas máquinas elétricas são isolados com material cuja escolha depende da tensão da máquina e da temperatura que ela deve suportar. Em geral, máquinas comuns, construídas para baixa tensão, são isoladas com materiais de classe A ou B.

As destinadas a produzir em tensões elevadas são isoladas com materiais de classe B ou H.

A tabela da Fig. 98 mostra os materiais empregados nas várias classes de isolamento e as elevações de temperatura admissíveis quando empregados nos induzidos das máquinas de corrente contínua.

Material	$(t_2 - t_1)$°C	*Classe de isolamento*
Isolamento de algodão não impregnado	40	A
Isolamento de papel e algodão impregnados e fios esmaltados	55	B
Isolamento de material inorgânico, Mica, Amianto, Porcelana, etc.	75	H

Fig. 98

CAPÍTULO VI

62 — Curvas características das máquinas de corrente contínua

As curvas características de uma máquina, denominadas, em geral, simplesmente de características, são curvas que mostram graficamente a relação de dependência existente entre os valores que caracterizam o funcionamento da máquina. As que interessam ao funcionamento dos dínamos são:

a) Característica de magnetização.

b) Característica externa.

c) Característica de regulação.

A característica de magnetização representa a relação existente entre a corrente de excitação e a tensão dos bornes da máquina quando esta funciona a vazio. Por esta razão chama-se também de característica a vazio. Esta curva mostra as qualidades do sistema indutor da máquina.

A característica externa representa a relação existente entre a tensão e a corrente que a máquina fornece a um circuito externo, isto é, quando funciona com carga. Por esta razão é chamada também de característica com carga. Esta curva mostra as qualidades do sistema induzido da máquina.

A característica de regulação representa a variação dos valores da corrente de excitação na máquina com carga, para que a tensão nos bornes da mesma se mantenha constante. Esta curva mostra tanto as qualidades do sistema indutor como as do induzido.

As máquinas de corrente contínua, conforme o tipo de excitação possuído, apresentam um comportamento específico, representado pelas características das mesmas. Por esta razão estas características são de suma importância para o estudo do comportamento das máquinas de corrente contínua. No decorrer do projeto de uma máquina, as mesmas são deduzidas por processo analítico, para depois serem comparadas com as levantadas por meio de ensaios executados com as próprias máquinas, depois de construídas.

A seguir serão examinadas as características dos seguintes dínamos:

— Com excitação independente.
— Com excitação em derivação.
— Com excitação em série.
— Com excitação composta.

63 — Características de funcionamento dos dínamos com excitação independente

a) *Característica de magnetização* — Considere-se o dínamo com excitação independente indicado na Fig. 99, tendo seu circuito de excitação alimentado por uma bateria de acumuladores.

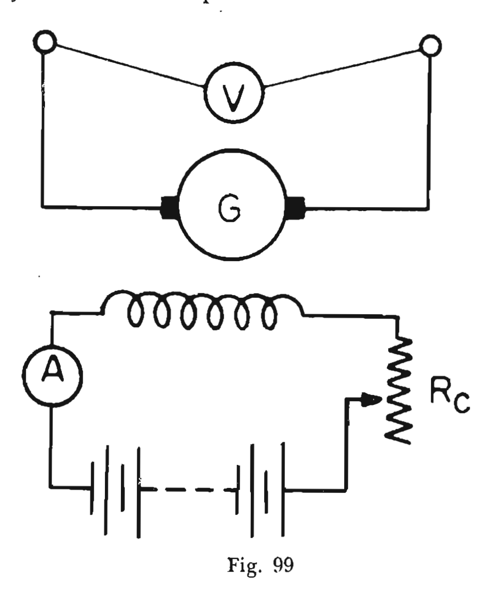


Fig. 99

Quando este dínamo trabalha sem carga, gera-se no seu induzido a f.e.m. expressa por:

$$E = 10^{-8} \frac{N \cdot n \cdot \phi}{60} \frac{p}{a}$$

Agrupando-se todos os valores fixos numa única constante, a fórmula antes escrita transforma-se em

$$E = K\ n\ \phi$$

Mantendo-se constante a rotação, o valor da f.e.m. é diretamente proporcional ao fluxo da máquina e portanto ao valor da indução existente no circuito magnético.

A indução magnética, por sua vez, depende das ampère-espiras magnetizantes, e portanto, da corrente de excitação, conforme consta no livro *Eletrotécnica,* parágrafo 103. Com a máquina funcionando a vazio a f.e.m. (E) varia ao variar a corrente de excitação. Por esta razão a curva que representa tal variação chama-se característica de magnetização.

A Fig. 100 representa a forma da característica a vazio, na qual a curva (1) mostra como aumenta a f.e.m. (E) quando a corrente de excitação cresce de zero até um determinado valor máximo. Esta curva é chamada de característica ascendente.

A característica não se inicia na origem dos eixos, se a máquina possuir magnetismo residual, como ocorre com a curva (2) indicada na figura, iniciando em A. A ordenada OA representa f.e.m. gerada pelo magnetismo residual.

A curva (2) indica como diminui a f.e.m. (E) quando a corrente de excitação, após ter alcançado o valor máximo i_M, diminui para zero. Por esta razão, a esta curva dá-se o nome de característica descendente.

O leve deslocamento para cima da curva (2) com relação à (1) é devido aos fenômenos de histerese magnética.

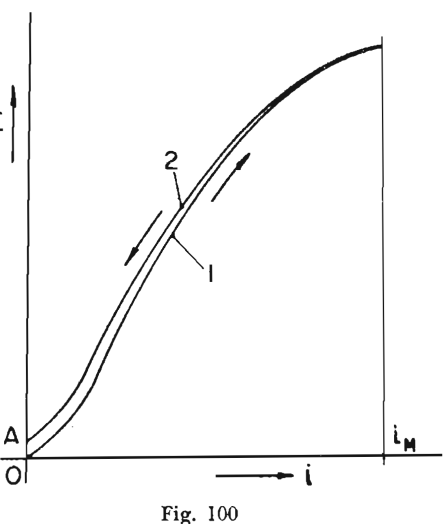


Fig. 100

A característica indicada na figura corresponde a uma determinada velocidade da máquina. Variando a velocidade variará também a característica, ficando mais alta se a velocidade aumentar ou mais baixa se diminuir.

Se a velocidade da máquina variar do valor normal *n* para valor n_1, o valor da f.e.m. variará do valor E para o valor E_1, conforme a seguinte proporção:

$$E : E_1 = n : n_1$$

Assim sendo, se no decorrer do ensaio, feito com velocidade normal n, o número de rotações variar para o valor n_1, o valor E_1 medido pelo voltímetro terá que ser corrigido para obter-se o valor de E que lhe corresponde à velocidade n, resultando

$$E = E_1 \frac{n}{n_1}$$

A característica de magnetização, de uma máquina já construída, é levantada por meio de ensaio, fazendo-se funcionar a máquina com a velocidade normal por meio de um motor, e alimentando o circuito de excitação por meio de uma fonte separada, como por exemplo uma bateria de acumuladores. A corrente de excitação, regulada por meio de um reostato de campo, é medida por meio de um amperímetro inserido no circuito. Os valores das f.e.m. são obtidos pela leitura de um voltímetro ligado aos bornes da máquina.

N.º	*i*	*Ea*	*Ed*
1			
2			
3			
4			
5			
6			

Fig. 101

Os valores de *E* e de *i*, feitos simultaneamente, são registrados numa tabela, conforme Fig. 101. Os valores Ea são relativos à curva ascendente e os Ed à curva descendente. De posse destes valores, constrói-se a curva de magnetização, colocando-se no eixo das abscissas os valores de *i* e nas ordenadas os correspondentes valores de *Ea* e de *Ed*.

Nas máquinas em projeto a curva de magnetização é obtida por cálculo fixando uma série de valores da f.e.m. E, e calculando-se os correspondentes valores do fluxo, por meio da fórmula

$$\phi = 10^8 \frac{60 \cdot E}{N \cdot n} \cdot \frac{a}{p}$$

e aplicando para cada valor do fluxo o esquema de cálculo indicado no livro *Eletrotécnica*, parágrafo 103, a fim de obter-se o número das ampère-espiras correspondentes. Neste caso, nas abscissas serão colocados diretamente os valores das ampère-espiras calculados.

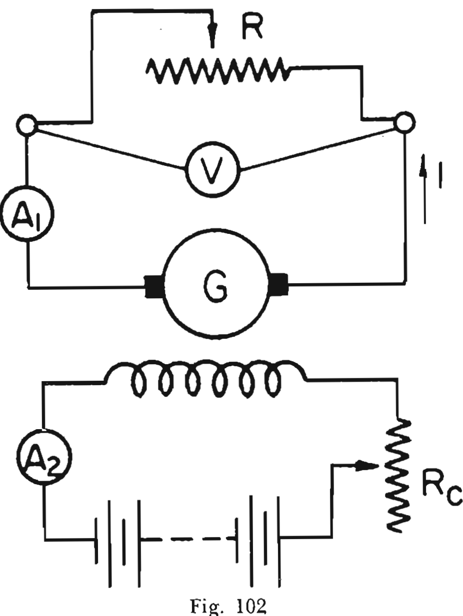


Fig. 102

b) *Característica externa* — Considere-se a máquina indicada na Fig. 102, que funciona com velocidade constante, tendo sido regulado o valor da corrente de excitação de forma que a vazio a máquina forneça a f.e.m. (E) correspondente à tensão nominal da máquina.

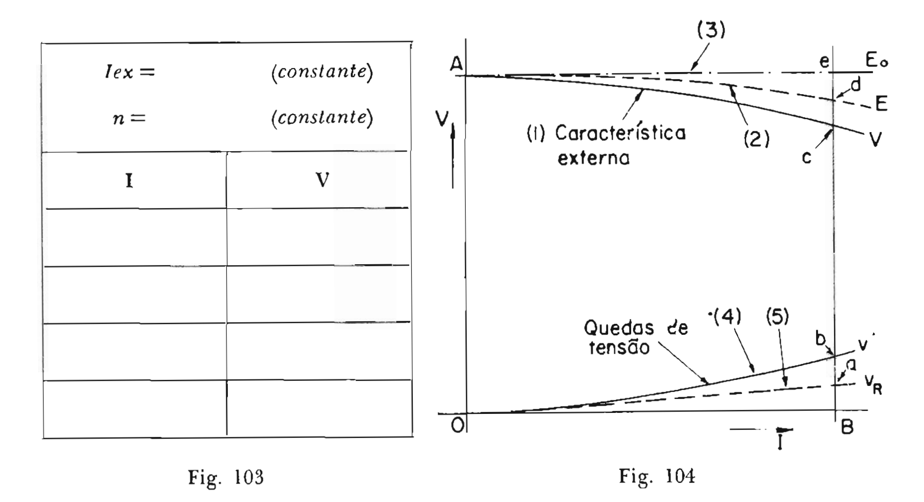
Ligando os bornes da máquina a um reostato de carga R, a mesma passará a fornecer uma corrente para o circuito externo.

Mantendo-se constante a corrente de excitação e a rotação da máquina, regula-se o reostato de carga de forma que a corrente externa I, medida pelo amperímetro A_1, passe por uma série de valores, até alcançar seu valor normal de funcionamento.

Estes valores são registrados numa tabela do tipo indicado na Fig. 103. Ao se registrarem os valores da corrente I, devem ser registrados também os valores da tensão V, medidos pelo voltímetro V. A medida dos valores de V deve ser feita simultaneamente com os valores de I.

Após o registro dos valores, se notará que, no decorrer das medidas, embora i_{ex} e n tivessem ficado constantes, a tensão nos bornes da máquina diminuiu gradativamente na razão em que a corrente de carga aumentava. Numa determinada condição de carga, a diferença $v = E - V$ representa a queda de tensão interna da máquina, quando esta fornece a corrente I.

Colocando-se sobre um sistema de eixos cartesianos os valores da corrente como abscissas e os valores da tensão como ordenadas, obter-se-á a curva (1) do diagrama indicado na Fig. 104.



Iex =	(*constante*)
n =	(*constante*)
I	V

Fig. 103 Fig. 104

Esta curva, que representa como varia a tensão nos bornes da máquina ao variar a corrente por esta fornecida, chama-se característica externa.

Para cada ordenada o segmento compreendido entre a curva (1) e a linha (3), representa a queda de tensão

$$\Delta v = E - V$$

Transportando-se os valores das quedas de tensão para cada ordenada, a partir da reta OB, obtém-se a curva (4), que representa como varia a queda de tensão interna da máquina.

Esta queda de tensão é devida a duas causas fundamentais, isto é:

a) Resistência ôhmica (do induzido, contato das escovas com o comutador e excitação em série, inclusive os pólos auxiliares).

b) Reação do induzido, que depende das ampère-espiras desmagnetizantes e das ampère-espiras transversais do induzido.

As quedas por resistência ôhmica são representadas pela reta (5), pois as mesmas são diretamente proporcionais à corrente I. As quedas por reação do induzido são representadas pelos segmentos compreendidos entre a reta (5) e a curva (4).

Nos dínamos de velha construção, com as escovas deslocadas do plano de inversão, a queda de tensão por reação do induzido alcança valores elevados. Nos dínamos de moderna construção, providos de pólos auxiliares, esta queda de tensão tem valores pequenos, em geral próximos dos valores da queda de tensão por resistência ôhmica.

Se às ordenadas da curva (1) somam-se as correspondentes das quedas ôhmicas, obtém-se a curva (2), cujas ordenadas representam os valores das f.e.m. que devem ser efetivamente geradas pela máquina. Esta curva chama-se característica total da máquina.

Ao se efetuar o levantamento da característica externa de uma máquina não é possível aumentar a corrente da mesma além do valor normal sem correr o risco de prejudicar a máquina. Efetuando as medidas rapidamente, é possível entretanto aumentar a carga da máquina até 50% além do normal. A tensão disponível nos bornes da máquina diminui, conforme indica a linha tracejada do diagrama indicado na Fig. 105. A corrente máxima se verificará quando os bornes da máquina resultarem diretamente ligados e portanto a máquina fechada em curto-circuito sobre si mesma.

Analisando-se o diagrama indicado na Fig. 105 conclui-se que:

a) O dínamo com excitação separada aumenta a corrente fornecida, ao diminuir a resistência do circuito externo, alcançando o valor máximo quando o valor da resistência do circuito externo for nulo, isto é, quando o dínamo estiver fechado em curto-circuito.

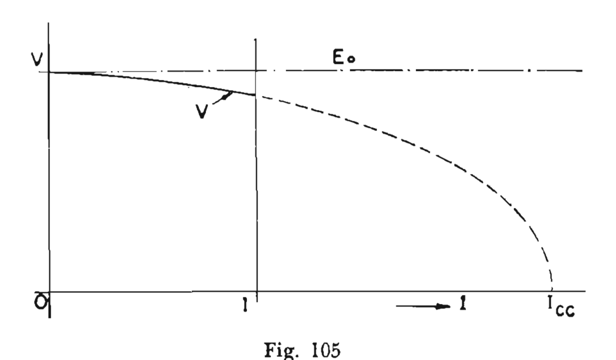


Fig. 105

b) Dentro dos limites de funcionamento, isto é, com uma sobrecarga máxima de 25%, o dínamo com excitação separada presta-se a fornecer a um circuito externo potência elétrica com tensão praticamente constante. Para corrigir as pequenas quedas de tensão que se verificam com o aumentar da carga, é suficiente a ação do reostato de excitação. No funcionamento a vazio o reostato de excitação está totalmente inserido. Sua exclusão gradual do circuito de excitação aumenta a corrente no mesmo, compensando as quedas de tensão que a corrente de carga provoca.

O valor da resistência deste reostato é calculado com o auxílio das características externas, de magnetização e a de regulação.

c) *Característica de regulação* — Transportando a curva (4) da Fig. 104 sobre a reta (1) da Fig. 106, obtém-se a curva (2), cujas ordenadas representam os valores da f.e.m. que a máquina deve gerar para que se mantenha constante a tensão em seus bornes ao variar a carga.

Se a ordenada V_1 da característica externa (3) representa o valor da tensão disponível nos bornes da máquina para uma determinada carga, a ordenada E_1 representa o valor da f.e.m. que a máquina deve gerar a fim de que, com esta condição da carga, a tensão disponível seja igual à tensão a vazio Vo.

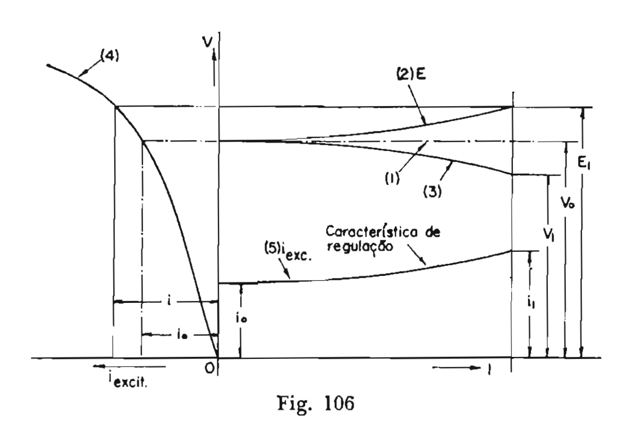


Fig. 106

Sobre a curva de magnetização (4), traçada à esquerda da característica externa, aos valores E_1 e Vo correspondem os dois valores da corrente de excitação i e io, respectivamente para o regime de carga considerado e para o funcionamento a vazio.

Se os valores da corrente de excitação, necessários para manter constante a tensão da máquina, ao variar a carga, são transportados em correspondência com as ordenadas dos valores da corrente fornecida pela máquina, obtém-se a curva (5) da Fig. 106. Esta curva é chamada de característica de regulação.

64 — Características de funcionamento do dínamo com excitação em derivação

a) *Característica a vazio* — A característica a vazio ou de magnetização dos dínamos com excitação em derivação pode ser calculada ou levantada pelos mesmos processos expostos para os dínamos com excitação separada. No caso de levantamento da característica é necessário desligar o circuito de excitação e alimentá-lo por meio de uma fonte separada de energia.

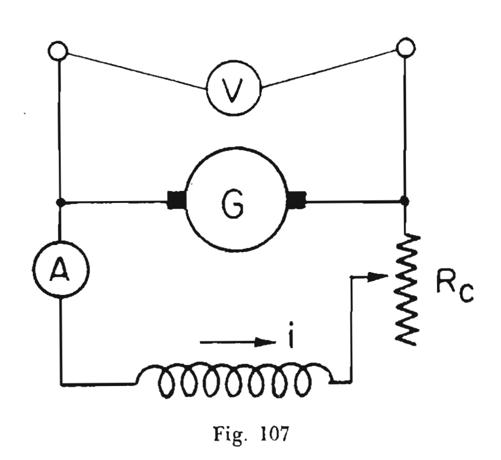


Fig. 107

Não se dispondo de uma fonte separada de energia, é possível aproveitar a tensão

da própria máquina, isto é, executando o ensaio com a máquina auto-excitada, conforme Fig. 107. O reostato Rc inserido no campo tem a finalidade de regular a corrente de excitação.

O resultado não é substancialmente diferente do obtido com a fonte separada de excitação, pois a corrente que atravessa o induzido é muito pequena (1% até 5% da corrente normal da máquina). Nestas condições as quedas que se produzem no induzido são desprezíveis.

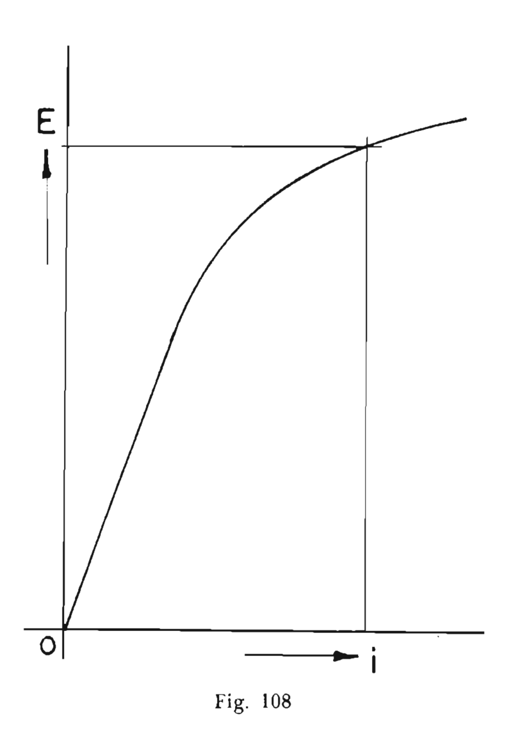


Fig. 108

Para que o dínamo possa funcionar com estabilidade, a tensão V do mesmo deve ser produzida, conforme Fig. 108, acima do joelho da característica. Se a tensão V da máquina for produzida abaixo do joelho da característica, o funcionamento da máquina não é estável, pois uma pequena variação da velocidade poderia provocar a perda da excitação da mesma. Pelo exposto, os circuitos magnéticos das máquinas de excitação em derivação devem funcionar levemente saturados.

b) *Característica externa* — Considere-se o dínamo excitado em derivação que alimenta a resistência de carga R, conforme Fig. 109. O induzido deste dínamo é percorrido pela corrente total I + i.

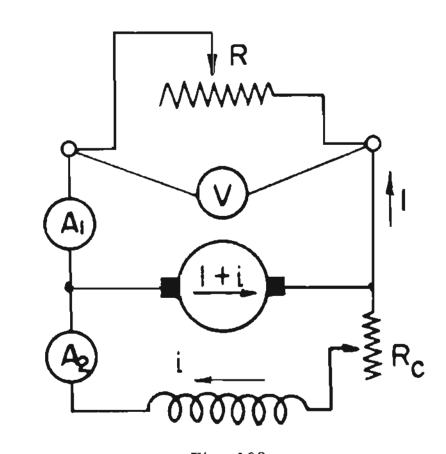


Fig. 109

Dentro do limite normal de carga, a característica ex-

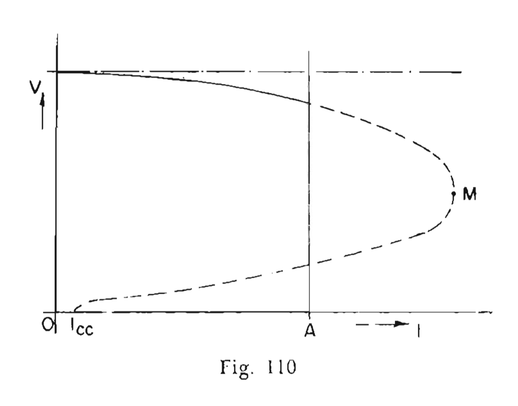


Fig. 110

terna, linha inteira da Fig. 110, apresenta o mesmo aspecto da característica externa do dínamo excitado separadamente, porém com uma queda mais acentuada que esta última.

Nos dínamos excitados em derivação, além da queda de tensão ôhmica e da reação do induzido, manifesta-se uma diminuição ulterior da f.e.m. pelo fato de que ao diminuir a tensão nos bornes da máquina, diminui também a corrente de excitação e portanto o fluxo indutor.

Aumentando-se a carga da máquina, aumenta-se a corrente fornecida e com esta a queda de tensão. A diferença de potencial existente nos bornes do dínamo diminui gradativamente. Como a cada diminuição da tensão da máquina corresponde um enfraquecimento da excitação, ocorre que em determinada situação (Ponto M da curva tracejada) a tensão disponível nos bornes da máquina não consegue mais fazer aumentar a corrente no circuito, passando esta a diminuir, conforme representa a linha tracejada da Fig. 110.

Diminuindo-se a resistência do circuito externo, até por o dínamo em curto-circuito, a tensão nos bornes da máquina anula-se e a corrente I_{cc} que circula na máquina é devida unicamente ao magnetismo residual e por isso seu valor é muito pequeno.

O fato do curto-circuito anular a diferença de potencial e a corrente de excitação dos dínamos excitados em derivação, torna estas máquinas autoprotegidas contra os efeitos danosos dos curtos-circuitos acidentais.

Ao ser levantada a característica externa de um dínamo com excitação em derivação não se deve exceder de 25% a sobrecarga da mesma, para não se correr o risco de danificá-la.

Do exposto deduz-se que, embora o dínamo de excitação em derivação tenha, no conjunto, um comportamento diferente do dínamo de excitação separada, no limite de carga normal o comportamento das duas máquinas é análogo. Dentro do limite de carga normal, se o dínamo excitado em derivação for bem construído, isto é, com baixa resistência elétrica no induzido e com efeito da reação do induzido limitado, a tensão diminui muito pouco ao aumentar a carga. A tensão poderá ser mantida praticamente constante por meio de um reostato de excitação R_e. Por esta razão, o dínamo de excitação em derivação é empregado para alimentar circuitos com tensão constante.

O valor da resistência do reostato de campo deve ser tal que quando totalmente inserido exista nos bornes do dínamo a vazio a tensão normal da máquina. Com o aumentar da carga, a fim de compensar as que-

das de tensão, o reostato de campo deve ser gradativamente desinserido, até que com carga máxima a tensão normal da máquina seja obtida com o reostato totalmente desinserido.

Os valores da corrente de excitação, necessários para manter constante a tensão pelas diferentes cargas, podem ser representados por uma curva de regulação que tem o mesmo aspecto da já examinada nos dínamos de excitação independente.

65 — Características de funcionamento do dínamo com excitação em série

a) *Característica a vazio* — O dínamo excitado em série é caracterizado pelo fato de ser a própria corrente que a máquina fornece ao circuito externo a que atua como corrente de excitação. Assim sendo, a característica a vazio terá como abscissas os próprios valores da corrente fornecida ao circuito externo.

A característica a vazio do dínamo excitado em série terá o mesmo aspecto das respectivas características dos dínamos de excitação separada e dos de excitação em derivação, sendo calculada da mesma forma.

O levantamento experimental da característica a vazio do dínamo excitado em série requer que o circuito de excitação seja desligado da máquina e alimentado por uma fonte separada de energia. Esta fonte separada de preferência deverá ser uma bateria de acumuladores de baixa tensão, mas capaz de fornecer elevada corrente.

b) *Característica externa* — O dínamo com excitação em série, funcionando com velocidade normal, não possui tensão em seus bornes se o circuito externo do mesmo estiver aberto, pois sendo nula a corrente fornecida será nula a corrente de excitação. Esta é a razão pela qual a característica externa do dínamo excitado em série inicia-se do valor zero.

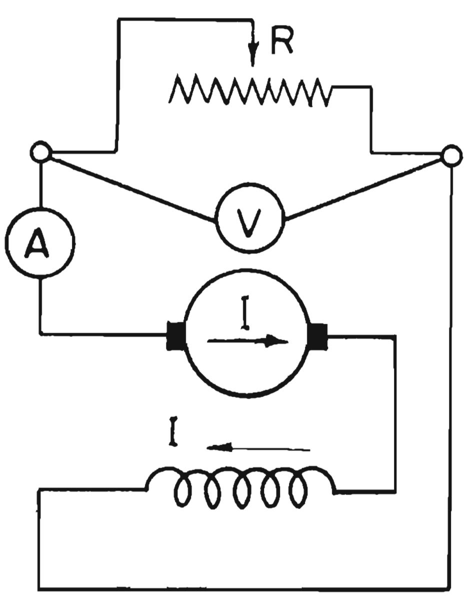


Fig. 111

Ligando-se os bornes do dínamo a uma resistência de carga, conforme Fig. 111, regula-se a corrente fornecida pelo dínamo, modificando-se gradativamente o valor da dita resistência. Quando o dínamo começa a fornecer corrente, excita-se, aumentando o valor da f.e.m. e o da tensão gerada. É com-

preensível portanto que a característica externa acompanhe, até certo ponto, a característica de magnetização, conforme mostra a Fig. 112.

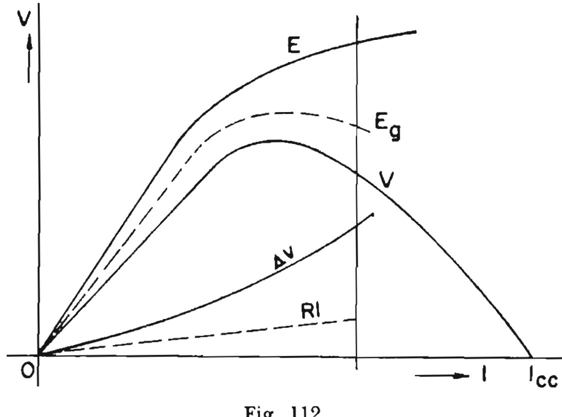


Fig. 112

A característica externa V pode ser obtida subtraindo-se das ordenadas da característica de magnetização E as da curva das quedas de tensão Δv.

Somando-se às ordenadas da característica externa as quedas de tensão de origem ôhmica da máquina, que se originam no induzido e no indutor, obtém-se a característica total (Eg).

Nota-se que a característica externa alcança o seu valor máximo em correspondência com o joelho da característica de magnetização, para depois decrescer até encontrar o eixo das abscissas em correspondência com o curto-circuito.

O decréscimo da característica externa será tanto mais acentuado quanto mais saturado for o circuito magnético da máquina e quanto mais elevado o efeito da reação do induzido. Convém lembrar que com o circuito magnético saturado e acréscimo de indução nos bicos polares de saída não compensa o enfraquecimento dos bicos polares de entrada.

Assim sendo, após o joelho da característica de magnetização, entrando o circuito magnético na fase de saturação, o acréscimo pequeno de f.e.m. que se processa ao aumentar da corrente magnetizante não chega a compensar as quedas de tensão ôhmicas e o efeito da reação do induzido, verificando-se então o rápido decréscimo da tensão V.

Do exposto vê-se claramente que a tensão nos bornes do dínamo excitado em série varia consideravelmente ao variar a carga.

A aplicação característica do dínamo excitado em série é a de alimentar circuitos com tensão variável e corrente praticamente constante. Esta aplicação é possível se o dínamo possuir circuito magnético saturado e acentuada reação do induzido. Neste caso o último trecho da característica externa decresce rapidamente, conforme indica a Fig. 113.

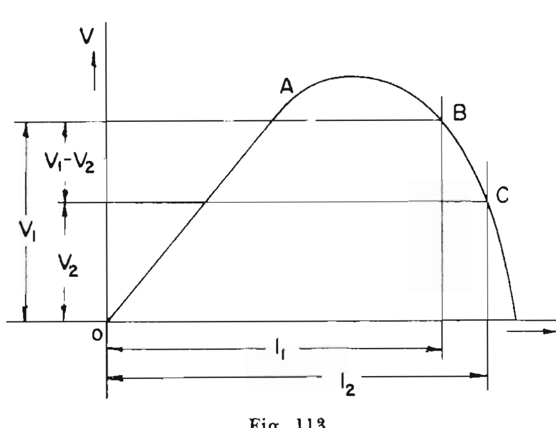


Fig. 113

No trecho OA da característica, o funcionamento da máquina é instável, pois pequenas variações da velocidade poderiam desexcitá-la. No trecho AB a utilização da máquina não é econômica, sendo muito pequena a corrente utilizável. No último trecho BC a utilização é possível, pois a pequenas variações da corrente correspondem grandes variações da tensão, resultando a máquina auto-regulada para intensidade de corrente constante. A máquina assim constituída presta-se a alimentar circuitos com corrente constante e tensão variável, como, por exemplo, circuitos de iluminação com lâmpadas em série.

Considere-se o caso da máquina estar alimentando um circuito de iluminação com 100 lâmpadas em série, com corrente I_1 e tensão V_1. Se um certo número de lâmpadas for excluído, a corrente no circuito tende a aumentar, mas ao aumentar, por exemplo para o valor I_2, a tensão nos bornes do circuito decresce ao valor V_2, ajustando-se automaticamente ao novo regime de funcionamento do circuito com um menor número de lâmpadas.

66 — Características de funcionamento do dínamo com excitação composta

a) *Característica a vazio* — O dínamo de excitação composta possui dois enrolamentos, isto é, um de excitação em derivação e outro de excitação em série. No funcionamento da máquina a vazio o comportamento da mesma é análogo ao do dínamo com excitação em derivação, valendo, portanto, para a característica de magnetização o que foi exposto para este último.

b) *Característica externa* — Examinando-se a característica externa do dínamo excitado em derivação, observa-se que a mesma decresce com o aumento da carga. Surge então a idéia de acrescentar a cada pólo indutor uma bobina de excitação em série, que produzindo uma f.m.m. proporcional à corrente fornecida, possa compensar as quedas de tensão e proporcionar à máquina uma tensão praticamente constante com o variar da carga.

A divisão das ampère-espiras entre o enrolamento em derivação e o em série deve então obedecer ao seguinte critério: — o primeiro deverá possuir as ampère-espiras necessárias à geração da tensão nominal a vazio, e o segundo as ampère-espiras necessárias a compensar as quedas de tensão e os efeitos da reação do induzido.

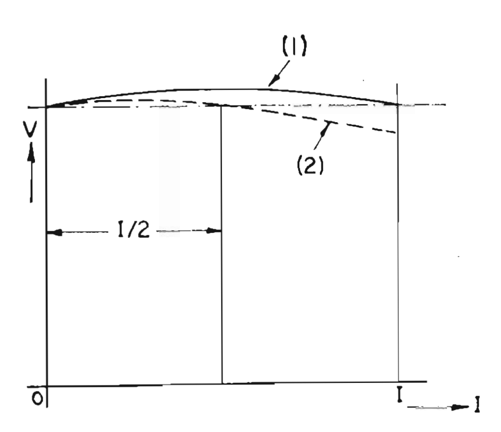


Fig. 114

Por efeito da saturação do circuito magnético da máquina, a compensação não se processa totalmente e a característica externa poderá adquirir a forma (1) ou (2) indicadas na Fig. 114. Na (1) a compensação verifica-se para a carga normal, enquanto na (2) a compensação processa-se na metade da carga.

Na curva (1), em todos os pontos intermediários entre o funcionamento a vazio e o de carga normal, os valores da tensão são levemente superiores ao valor da tensão a vazio. Na curva (2), os valores da tensão, superiores ao do valor V, verificam-se a partir do funcionamento a vazio até metade da carga. Deste ponto em diante, até a carga normal, os valores de V são levemente inferiores ao da tensão a vazio.

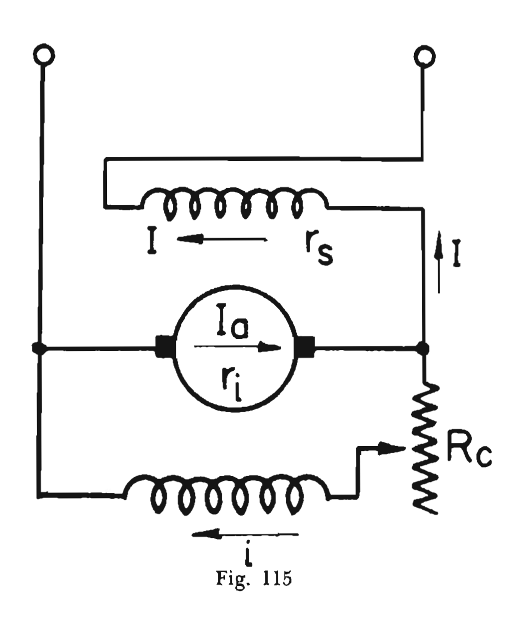


Fig. 115

A característica total da máquina com excitação composta é obtida somando-se às ordenadas da característica externa os valores das quedas de tensão produzidas pelas resistências internas da máquina.

Se o dínamo for de derivação curta, conforme Fig. 115, a corrente na armadura será: $Ia = I + i$, e o enrolamento em série será atravessado pela corrente I, verificando-se:

$$Eg = V + r_i \cdot I_a + r_s \cdot I$$

Se a máquina for de derivação longa, conforme Fig. 116, verifica-se que tanto o induzido quanto o indutor em série são percorridos pela corrente Ia, resultando

$$Eg = V + I_a \ (r_i + r_s).$$

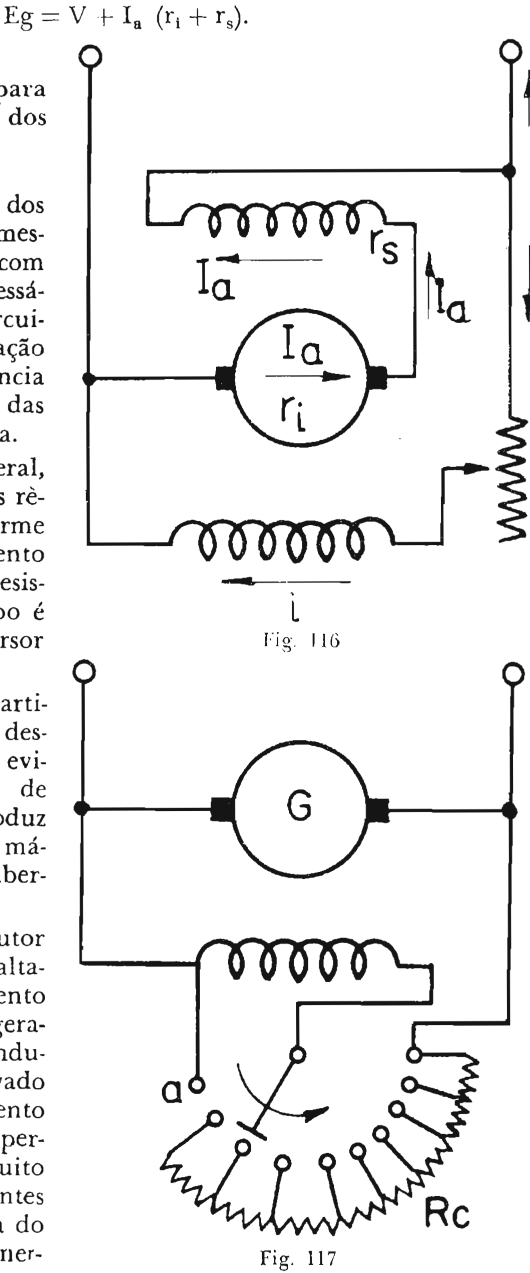


Fig. 116

Fig. 117

67 — Reostatos usados para regular a excitação dos dínamos

Para regular a tensão dos dínamos, a fim de que a mesma permaneça constante com o variar da carga, é necessário conetar em série ao circuito de excitação em derivação um reostato, cuja resistência é calculada com ajuda das características da máquina.

Estes reostatos, em geral, são construídos por várias rèsistências em série, conforme indica a Fig. 117. O aumento ou a diminuição destas resistências em série ao campo é feito por meio de um cursor rotativo.

O contato *a* é uma particularidade de construção destes reostatos e serve para evitar o efeito da f.e.m. de auto-indução que se produz ao circuito indutor da máquina no momento da abertura do mesmo.

Sendo o circuito indutor das máquinas elétricas altamente indutivo, no momento da abertura do mesmo gera-se uma f.e.m. de auto-indução, com valor tão elevado que pode furar o isolamento do mesmo. O contato *a* permite fechar em curto-circuito o enrolamento indutor antes de processar-se a abertura do mesmo, de forma que a ener-

gia acumulada no campo magnético faz circular, no circuito fechado, uma corrente que, extinguindo-se lentamente, não permite a geração de apreciável f.e.m. de auto-indução.

68 — Cálculo do enrolamento de excitação em derivação

Nos dínamos com excitação em derivação é preciso ter presente que, mesmo possuindo os pólos auxiliares, não é possível eliminar-se totalmente o efeito da reação do induzido transversal (esta só é eliminada pelos enrolamentos compensadores). Tal efeito enfraquece o fluxo, pois o aumento de indução que se processa nos bicos polares de saída não compensa a diminuição da indução dos bicos polares de entrada. A fim de se compensar esta diminuição do fluxo é preciso aumentar as ampére-espiras necessárias a cada pólo da máquina. A reação do induzido depende do grau de saturação do circuito magnético e é proporcional à corrente da máquina e por conseguinte ao número dos ampère-condutores da mesma. Nas máquinas de construção normal o acréscimo das ampère-espiras por pólo corresponde a aproximadamente 10% das ampère-espiras totais do induzido.

Nos dínamos com excitação composta, estas ampère-espiras deverão ser produzidas pela bobina de excitação em série.

O enrolamento de excitação deverá ser de tal forma proporcionado que a máquina possua nos seus bornes a tensão nominal, mesmo quando sofrer uma sobrecarga de 25%. O número máximo de ampère-espiras por pólo deverá ser calculado para esta sobrecarga. Além disso, por motivo de segurança, este valor das ampère-espiras será aumentado de 10%.

Conhecido o número das ampère-espiras por pólo NI é preciso determinar o número das espiras por pólo N e a seção do condutor a ser usado nas bobinas de excitação.

Os dados de que se dispõe são: as ampère-espiras NI e a tensão que atua cada pólo. Ao se calcular a tensão em cada pólo é preciso ter presente que no circuito de excitação está inserido um reostato de regulação. Este reostato faz com que as ampère-espiras correspondentes à carga normal da máquina sejam fornecidas com uma tensão que é inferior de aproximadamente 20% à normal da máquina. Este fato permite, ao se excluir o último trecho do reostato, aumentar a corrente de excitação a fim de superar-se uma eventual sobrecarga.

Se todas as bobinas são ligadas em série, a tensão atuante em cada pólo com carga normal resulta:

$$v_p = \frac{0{,}8 \cdot V}{2p} \quad \text{ou com carga máxima}$$

$$v'_p = \frac{V}{2p}$$

A resistência da bobina é fornecida por:

$$R = 10^{-2} \rho \cdot \frac{L}{S}$$

onde ρ é a resistividade do cobre, que com a bobina quente resulta $\rho = 2{,}16$ microohms-cm; L é o comprimento do condutor em metros, que resulta $L = N \cdot l_m$ sendo l_m o comprimento em metros de espira média e S a superfície do condutor em mm².

O valor da corrente na bobina resulta:

$$I = \frac{v_p}{R}$$

de onde:

$$I = \frac{v_p}{10^{-2} \cdot \rho \cdot \frac{N \cdot l_m}{S}} = \frac{100 \cdot v_p \cdot S}{\rho \cdot N \cdot l_m}$$

As ampère-espiras da bobina resultam:

$$NI = \frac{100 \cdot v_p \cdot S \cdot N}{\rho \cdot N \cdot l_m} = \frac{100 \cdot v_p \cdot S}{\rho \cdot l_m}$$

de onde:

$$S = \frac{\rho \cdot l_m \cdot NI}{100 \cdot v_p} = \frac{0{,}0216 \cdot l_m \cdot Ae}{v_p}$$

Determinada a seção do condutor, escolhe-se o tipo de condutor a ser enrolado e calcula-se o número de espiras que podem ser enroladas em cada pólo. O número destas espiras depende da área S_b disponível para a bobina e da seção do condutor a ser usado. Para bobinas enroladas com condutores redondos ou quadrados isolados com algodão, a área total do cobre S_{cu}, que pode ser enrolado numa bobina, obtém-se multiplicando a área S_b disponível para a bobina pelo fator de enchimento, que em média pode ser considerado $K = 0{,}55$.

Calcula-se o número de espiras dividindo-se a área disponível para o cobre S_{cu} pela seção do condutor, isto é:

$$N = \frac{S_{cu}}{S}$$

Nos enrolamentos de uma única camada, o número de espiras obtém-se dividindo a altura da bobina pela espessura do condutor isolado.

A densidade de corrente, nos condutores é dada por

$$\delta = \frac{I^A}{S\ mm^2}$$

e deve ser compreendida entre os valores seguintes:

Para bobinas subdivididas em discos ou tubos $\delta = 1{,}2$ até $3{,}5\ A/mm^2$

Para bobinas não subdivididas $\delta = 1{,}2$ até $2{,}5\ A/mm^2$

Os valores da altura das bobinas de excitação das máquinas de corrente contínua podem ser avaliados aproximadamente por meio da tabela da Fig. 118.

τ	*Altura do enrolamento de excitação dos pólos principais h_a = cm*				
cm	2p = 2	2p = 4	2p = 6	2p = 8	2p = 10 ou mais
10	—	—	—	12	13
15	—	—	11	14	15
20	—	—	13	15	16
25	9	9	14	17	18
30	11	11	16	19	20
35	13	13	18	21	22
40	14	14	20	22	23
45	16	16	22	24	25
50	18	18	24	26	27
55	20	20	25	28	29
60	21	21	27	29	30

Fig. 118

A verificação sucessiva do espaço livre para o enrolamento e o respectivo aquecimento dirá se é necessário alterar o valor escolhido com o auxílio da tabela.

69 — Cálculo do enrolamento de excitação em série

O enrolamento de excitação em série, seja ele do pólo principal (máquinas excitadas em série ou com excitação composta) ou do pólo auxiliar, é atravessado pela corrente do induzido ou uma fração desta. Assim sendo, conhecido o valor da corrente I e o das ampère-espiras Ae, que o enrolamento deve produzir, o número das espiras é obtido pela relação:

$$N = \frac{Ae}{I}$$

A densidade de corrente nos enrolamentos de excitação em série deverá ser escolhida conforme indicado a seguir:

Enrolamentos dos pólos principais com bobina subdividida $\delta = 2,5$ até 4 A/mm². Enrolamento dos pólos principais com bobina não subdividida $\delta = 2,5$ até 3,5 A/mm².

Enrolamento dos pólos auxiliares $\delta = 2,5$ até 4 A/mm².

A densidade de corrente nas bobinas de excitação em série é em geral mais elevada do que a relativa às bobinas de excitação em derivação, pois poucas espiras com barra de cobre dissipam mais facilmente o calor do que muitas espiras de fio fino, isolados uns dos outros com algodão. Além disso, nas espiras de excitação em série a corrente varia com a carga da máquina, o que não se dá nas espiras de excitação em derivação, nas quais a corrente está sempre próxima do valor máximo.

70 — Aquecimento dos enrolamentos indutores

Nas máquinas elétricas de corrente contínua os enrolamentos indutores estão parados. A elevação de temperatura das bobinas é diretamente proporcional às perdas de potência que se verificam por efeito joule nos seus condutores, e inversamente proporcional à superfície de irradiação.

Nas bobinas não subdivididas, considera-se como superfície de irradiação unicamente a superfície lateral da bobina.

Nas bobinas subdivididas, considera-se como superfície de irradiação a superfície lateral e uma superfície lateral de cada canal de ventilação.

Nos indutores das máquinas de corrente contínua a elevação de 40°C é produzida pela irradiação de 800 watts por metro quadrado nas

máquinas mal ventiladas e de 1200 W/m² nas máquinas bem ventiladas. Isto quer dizer que o coeficiente de adução, ou seja, a quantidade de W/m² necessários para provocar a elevação de temperatura de 1°C, resulta:

Para máquinas fechadas (mal ventiladas)

$$K = 20 \text{ W/m}^2 \text{ °C}$$

Para máquinas abertas (bem ventiladas)

$$K = 30 \text{ W/m}^2 \text{ °C}$$

O valor da elevação de temperatura no indutor resulta:

$$\triangle T = \frac{W/m^2}{K}$$

Os valores de K acima indicados são relativos a enrolamentos executados numa única camada com condutor em forma de barra, virado de costa. Nas bobinas executadas com fio comum, isolado com algodão, a condução térmica é menor, pois é dificultada pelo isolamento interposto. Por isso os valores acima indicados deverão ser reduzidos de 20%.

A elevação de temperatura admissível depende do isolante do condutor usado, resultando assim:

A elevação de temperatura admissível nas bobinas de excitação em derivação é de . . . . 65°C

Nos pólos auxiliares a elevação de temperatura admissível é de 60°C

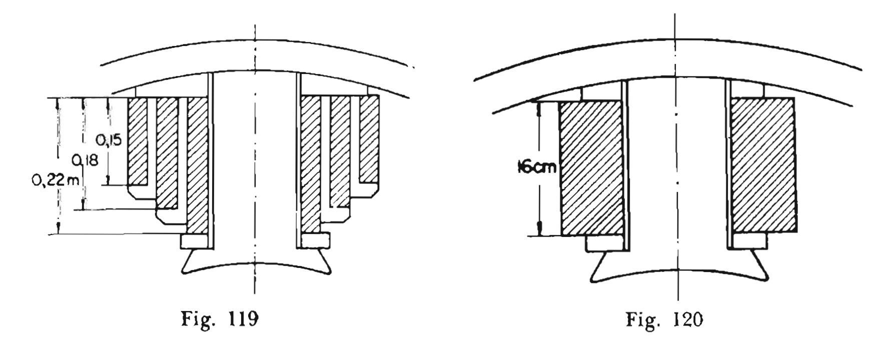


Fig. 119 Fig. 120

Exercício 1

Uma máquina de corrente contínua aberta possui as bobinas de excitação em derivação conforme indica a Fig. 119. A perda de potência em cada bobina é de 1200 watts. O condutor usado é retangular, isolado com algodão impregnado. O comprimento da espira média é $l_m = 1{,}4$ m.

Calcular a elevação de temperatura do enrolamento.

Solução:

A superfície de irradiação resulta:

$$S = (0{,}22 + 0{,}18 + 0{,}15)\ 1{,}4 = 0{,}77\ m^2$$

A perda por m^2 resulta:

$$W/m^2 = \frac{1200}{0{,}77} = 1558$$

Sendo a máquina aberta, considera-se $K = 30$

A elevação de temperatura resulta:

$$\Delta T = \frac{W/m^2}{K} = \frac{1558}{30} = 51{,}7^oC$$

A elevação de temperatura é aceitável, pois nas bobinas de excitação em derivação a elevação admissível de temperatura é de 65°C.

Exercício 2

Uma máquina de corrente contínua, aberta, possui as bobinas de excitação dos pólos principais conforme Fig. 120. A perda de potência em cada bobina é 180 watts. O condutor usado é redondo, isolado com algodão impregnado. O comprimento periférico externo da bobina é $l_e = 1{,}1$ m. Calcular a elevação de temperatura da bobina.

Solução:

A superfície de irradiação resulta:

$$S = 0{,}16 \times 1{,}1 = 0{,}176\ m^2$$

A perda por metro quadrado resulta:

$$W/m^2 = \frac{180}{0{,}176} = 1022\ \text{watts}/m^2$$

Sendo a máquina aberta, considera-se $K = 30$. Sendo porém a bobina executada com fio redondo isolado, é preciso deduzir deste valor 20%, isto é

$$K = 30 \cdot 0{,}8 = 24$$

A elevação de temperatura resulta:

$$\Delta T = \frac{W/m^2}{K} = \frac{1022}{24} = \sim 43^oC$$

A elevação de temperatura é aceitável, pois nas bobinas de excitação em derivação a elevação admissível é de 65°C.

71 — Capacidade do ventilador

Toda a energia perdida na máquina, por fenômenos elétricos, magnéticos e mecânicos, converte-se em calor, que é irradiado no ambiente. Nas máquinas de construção aberta, este calor é livremente transmitido para o ar, o que não se verifica nas máquinas de construção fechada. Nestas últimas, as calorias produzidas pelas perdas devem ser retiradas por meio de correnteza de ar produzida por um ventilador, que na maioria dos casos está preso ao próprio eixo da máquina.

Nas máquinas modernas, onde o peso e, portanto, o volume por unidade de potência, é muito reduzido, as superfícies de irradiação são relativamente pequenas, o que predispõe as máquinas a aquecimento elevado. Estas máquinas necessitam de ventilação eficiente, para evitar que seus órgãos aquecidos prejudiquem o poder isolante dos materiais empregados em sua fabricação.

Para o cálculo da capacidade do ventilador devem ser computadas todas as perdas que se verificam na máquina, excluindo as de ventilação e as que se verificam no reostato de excitação, pois estas últimas se produzem fora da máquina.

Uma vez conhecidas as perdas totais W_t no interior da máquina, a quantidade de ar em metros cúbicos por minuto necessária à refrigeração da mesma é fornecida por:

$$Q = \frac{0{,}24 \cdot W_t \cdot 60 \cdot 10^{-3}}{0{,}5 \cdot T \cdot p \cdot c}$$

na qual: Q é a capacidade do ventilador em metros cúbicos por minuto; W_t a perda total da máquina em watts; o produto $0{,}24 \cdot W_t \cdot 60 \cdot 10^{-3}$ representa o número de grandes calorias produzidas pela máquina em cada minuto; T é a elevação da temperatura admissível em graus CELSIUS; p é o peso específico do ar (1, 2) e *c* é o calor específico do ar em calorias por kg (0,237).

Substituindo-se os valores mencionados e simplificando a fórmula resulta:

$$Q = \frac{0{,}1 \cdot W_t}{T}$$

As perdas a serem computadas para o cálculo da capacidade do ventilador são:

1 — Perdas no comutador (atrito e queda de tensão)
2 — Perdas no induzido (no ferro e no cobre)
3 — Perdas nas expansões polares (superficiais = 1/3 das perdas nos dentes rotóricos)
4 — Perdas nas bobinas de excitação (série e paralela)
5 — Perdas nos pólos auxiliares
6 — Perdas adicionais

72 — Rendimento do dínamo

Define-se rendimento de uma máquina a relação entre a potência por esta fornecida W e a correspondente potência absorvida.

A potência absorvida é igual à soma da potência fornecida mais as perdas, isto é

$$Wi = W + Wp$$

O rendimento da máquina resulta:

$$\mu = \frac{W}{Wi} = \frac{W}{W + Wp} \text{ de onde}$$

$$Wi = \frac{W}{\mu}$$

Para o cálculo do rendimento, deverão ser computadas todas as perdas da máquina, inclusive as de ventilação e as que se verificam no reostato de excitação.

Assim sendo, as perdas a serem consideradas são:

1 — Perdas totais no comutador.
2 — Perdas totais no induzido.
3 — Perdas nas expansões polares.
4 — Perdas totais no circuito de excitação em derivação.
5 — Perdas no circuito de excitação em série.
6 — Perdas nos pólos auxiliares.
7 — Perdas mecânicas.
8 — Perdas adicionais (1% da potência total).

Os valores aproximados dos rendimentos das máquinas de corrente contínua, em função da potência, estão indicados na tabela da Fig. 121.

Rendimento das máquinas de corrente contínua em função da potência

Potência kW	1	2	3	5	7	10	20	30
Rendimento	0,74	0,77	0,80	0,82	0,83	0,84	0,85	0,86
Potência kW	50	70	100	200	300	500	700	1000
Rendimento	0,87	0,88	0,89	0,90	0,91	0,915	0,92	0,93

Fig. 121

CAPÍTULO VII

73 — Solicitações elétricas do induzido

Chama-se solicitação elétrica do induzido o efeito que os condutores do induzido, percorridos por corrente, exercem na zona do entreferro ou então na periferia do induzido.

Se N_c é o número total dos condutores induzidos e I_a a corrente que os atravessa, o produto $N_c \cdot I_a$ fornece o número dos ampère-condutores ou os ampère-fios que atuam no induzido.

Se o comprimento periférico do induzido for grande, um certo número de ampère-condutores $N_c \cdot I_a$ terá pequeno efeito, pois os mesmos resultam muito espalhados. Se, pelo contrário, o comprimento periférico do induzido for pequeno, os ampère-condutores $N_c . I_a$ atuarão de maneira concentrada e terão, portanto, um efeito considerável.

Do exposto percebe-se que a atuação dos ampère-condutores induzidos constitui uma grandeza característica das máquinas elétricas. A fim de se caracterizar esta atuação, define-se como "Densidade Linear da Corrente" num induzido o número de ampère-fios que atuam em cada centímetro da superfície periférica do mesmo; assim sendo, se D é o diâmetro do induzido, a densidade linear da corrente resulta:

$$A = \frac{N_c \cdot I_a}{\pi D}$$

O valor A da densidade linear da corrente não pode, entretanto, superar determinados limites, pois dele depende o valor da f.e.m. de reatância que se gera na comutação. Além disso, um valor elevado de A implica no uso de uma área grande destinada ao cobre, e com isso de uma área grande da ranhura, o que obriga a estreitar a base dos dentes, resultando os mesmos sem resistência mecânica e com elevado valor da indução.

Para máquina de pequena potência o valor de A varia entre 120 e 200 ampère-condutores por centímetro. Para máquinas de média e grande potência, com pólos auxiliares, A varia entre 200 e 400 ampère-condutores por centímetro.

74 — Solicitações magnéticas

O ponto crítico do circuito magnético de uma máquina elétrica é o entreferro. Por isso este último é tomado como ponto de partida para se fixarem todas as solicitações magnéticas da máquina.

O valor da indução magnética B_e na superfície periférica da expansão depende do volume da máquina e da energia gasta na excitação da mesma. Não é aconselhável escolher valores exagerados da indução B_e, pois isso provocaria excessivas dispersões magnéticas. Os valores médios da indução B_e variam de 5000 para as máquinas pequenas a 11000 para as máquinas grandes, conforme indica a tabela da Fig. 122.

A mencionada figura fornece os valores da indução média a serem adotados nas máquinas de corrente contínua, em função da relação

$$\frac{W}{r.p.m}$$

Nas demais partes do circuito magnético podem ser adotados os seguintes valores:

Carcaça induzida	10 000 até 15 000 gauss
Dentes do induzido na parte mais estreita	18 000 até 25 000 gauss
Núcleos polares	12 000 até 16 000 gauss
Carcaça estatórica em aço fundido	11 000 até 15 000 gauss
Carcaça estatórica em gusa	5 000 até 7 000 gauss

As induções indicadas pela carcaça do induzido referem-se às carcaças que não possuem furos de ventilação ou furos para parafusos de junção. Quando tais furos existem, nos pontos de menor seção admite-se a indução de 18 000 gauss, desde porém que os comprimentos dos referidos trechos sejam pequenos.

As carcaças estatóricas, para poderem resistir às solicitações mecânicas, a que estão sujeitas, possuem grande seção, pelo que a indução magnética nas mesmas adquire valores consideravelmente inferiores aos indicados.

75 — Número de pólos

As máquinas multipolares são mais leves e de construção mais econômica que as bipolares. Aumentando-se o número dos pólos da máquina diminui o fluxo nos circuitos magnéticos, diminuindo a seção da carcaça estatórica e da rotórica. O peso do cobre empregado no induzido também diminui com o aumento do número dos pólos, pois fica reduzido o comprimento das ligações frontais das bobinas.

Por outro lado, convém lembrar que aumentando o número dos pólos, estes ficam mais próximos um do outro e provocam maior dispersão. O número dos pólos, em função da relação $\frac{W}{r.p.m}$ pode ser obtido pela Fig. 122.

VALORES CARACTERÍSTICOS EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO W/r.p.m				
W/r.p.m	*Diâmetro do induzido cm*	*Número de pólos 2p*	*Indução na periferia da expansão Be*	*Altura da ranhura hr-mm*
2	15	2	5000	23
5	18	4	5400	24
10	21	4	5600	25
20	25	4	6200	25
30	27	4	6300	26
40	30	4	7000	28
50	35	4	7500	30
100	45	4	8000	35
150	50	4	8500	36
200	58	6	9000	38
300	66	6	9200	38
400	72	6	9400	40
500	80	6	9600	40
700	90	6	9800	42
1000	100	8	10000	42
1500	120	8	10200	43
2000	130	8	10300	44
3000	150	10	10500	45
4000	160	10	10600	45
5000	170	12	10700	46
7000	190	14	10800	46
10000	220	16	10900	46

Fig. 122

76 — Dimensões dos pólos

O parâmetro de utilização magnética da máquina é constituído pelo fluxo magnético:

$$\phi = B_e \cdot S_p$$

onde S_p é a superfície periférica da expansão polar e B_e a indução na seção periférica da expansão. A superfície da expansão polar é fornecida por:

$$S_p = \tau_p \cdot L$$

onde L é o comprimento axial da expansão, que em geral coincide com o comprimento geométrico do induzido e τ_p é o comprimento do arco da expansão polar.

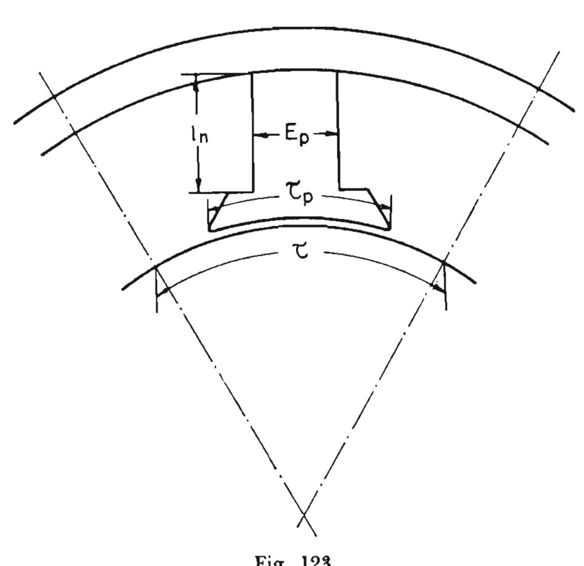


Fig. 123

O comprimento do arco da expansão polar é menor que o passo polar, conforme Fig. 123, resultando $\frac{\tau_p}{\tau} = \psi$ ou $\tau_p = \psi \cdot \tau$

Para máquinas com pólos auxiliares

$$\psi = 0{,}6 \text{ até } 0{,}7$$

Para máquinas sem pólos auxiliares

$$\psi = 0{,}65 \text{ até } 0{,}75$$

A largura dos pólos principais E_p pode ser adotada tomando-se por base os valores indicados na tabela da Fig. 124.

A altura do núcleo l_n resulta da altura da bobina de excitação, cujos valores estão contidos na tabela da Fig. 118.

τ *cm*	*Largura do núcleo polar mm*
10	35
15	65
20	75
25	130
30	155
35	190
40	215

Fig. 124

77 — Profundidade da ranhura

As dimensões das ranhuras devem estar compreendidas entre determinados limites, pois se as dimensões da ranhura são pequenas, obter-se-á deficiente aproveitamento elétrico da máquina, o que a tornará de construção muito cara.

Ranhuras com dimensões excessivas apresentam elevada indutância de dispersão, e valor elevado da densidade linear periférica do induzido, o que representa excessivas perdas para as superfícies de irradiação do calor.

A tabela da Fig. 125 indica os valores da profundidade da ranhura em função do diâmetro do induzido.

PROFUNDIDADE DA RANHURA	
Diâmetro do induzido cm	h_R *mm*
20	23
40	34
60	38
80	42
120	43
280	45

Fig. 125

78 — Velocidade periférica do induzido

O número das rotações por minuto *n* com que um dínamo funciona depende do tipo do motor de acionamento. A velocidade periférica do induzido depende do número de rotações por minuto e do diâmetro do induzido D, resultando

$$v' = \pi \cdot D \cdot n \text{ em metros por minuto ou}$$

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} \text{ em metros por segundo}$$

A velocidade periférica do induzido das máquinas de corrente contínua deve ser inferior a 30 m/seg, a fim de limitar as solicitações devidas à força centrífuga.

79 — Relação entre as dimensões do induzido

O comprimento do induzido deve ter valores pequenos em relação ao diâmetro do mesmo, isso porque tanto a tensão de comutação como a tensão entre duas lâminas adjacentes do comutador aumentam com o aumento do comprimento do induzido. Além disso, o próprio resfriamento da máquina é mais fácil quando o induzido possui comprimento reduzido e diâmetro grande.

Pelas razões expostas, considera-se aceitável o comprimento do induzido quando a relação entre o comprimento magnético do mesmo e o do passo polar estiver compreendida entre 0,5 e 1, isto é

$$0{,}5 \leq \frac{L_m}{\tau} \leq 1$$

80 — Entreferro

A fim de se obter uma distribuição conveniente das linhas de força no entreferro, facilitar a comutação e eliminar a formação de zumbido, o perfil das expansões polares não deve ser cilíndrico. Embaixo dos bicos polares o comprimento do entreferro é levemente maior que na zona central do pólo. Esta disposição permite a entrada dos condutores embaixo do pólo de forma progressiva.

Nas máquinas com pólos auxiliares o comprimento do entreferro na zona média do pólo é calculado pela fórmula seguinte:

$$l_e = \sim t \cdot \frac{A \cdot \tau}{B_{entr}}$$

onde:

A = Ampère-condutores por centímetro de periferia.

τ = Passo polar em centímetros.

B_{entr} = Indução no entreferro.

$t = 0{,}4$ ou $0{,}5$.

Nas máquinas desprovidas de pólos auxiliares o comprimento acima calculado deverá ser aumentado de 30%.

81 — Cálculo mecânico do eixo do induzido

O eixo do induzido de uma máquina elétrica é solicitado à torção e flexão. O cálculo de seu diâmetro é feito pela solicitação de torção, pois pelas dimensões das máquinas normais se o eixo for estável à torção o será também à flexão.

O menor diâmetro do eixo encontra-se no ponto onde é montada a junta ou a polia de comando. Deste ponto o eixo aumenta gradativamente nas buchas, embaixo do comutador e em correspondência com a carcaça induzida, conforme Fig. 127.

O cálculo do diâmetro menor do eixo, isto é, em correspondência com a polia ou com a junta, é feito com base na seguinte fórmula:

$$d = K \cdot \sqrt[4]{\frac{W_i}{n}}$$

d = diâmetro em cm

W_i = potência interna da máquina em watts.

n = rotações por minuto.

K é uma constante que varia entre 2,6 para máquinas pequenas e 2,8 para máquinas grandes.

O eixo será estável à flexão se o diâmetro maior do mesmo for aproximadamente igual a 0,08 L_s, onde L_s representa a distância entre os pontos de apoio.

82 — Cálculo do diâmetro e do comprimento do induzido

Os dados para o projeto de um dínamo são: potência em watts ou kW, tensão e número de rotações por minuto. O primeiro passo no projeto de um dínamo consiste em determinar o diâmetro e o comprimento do induzido visando a melhor utilização elétrica e magnética da máquina.

Os fatores básicos no funcionamento de um dínamo são o número de rotações e o fluxo que, atravessando o entreferro, penetra no induzido produzindo a geração das f.e.m. e da corrente. O valor deste fluxo é dado pelo produto da seção da expansão polar pela indução B_e existente na superfície periférica da expansão.

Se τ é o passo polar, o arco da expansão, conforme parágrafo 76, será $\tau_p = \psi \cdot \tau$. Se L_m é o comprimento magnético do induzido, o fluxo resulta:

$$\phi = \tau_p \cdot L_m \cdot B_e = \psi \cdot \tau \cdot L_m \cdot B_e = \psi \cdot \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p} \cdot L_m \cdot B_e$$

A força eletromotriz gerada por este fluxo no circuito induzido resulta:

$$E = 10^{-8} \cdot N_c \cdot \frac{n}{60} \cdot \frac{p}{a} \cdot \phi = 10^{-8} \cdot N_c \cdot \frac{n}{60} \cdot \frac{p}{a} \cdot \psi \cdot \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p} \cdot L_m \cdot B_e =$$

$$= 10^{-8} \, \frac{N_c \cdot n \cdot \psi \cdot \pi \cdot D \cdot L_m \cdot B_e}{120 \cdot a}$$

A potência interna da máquina, em watts, resulta:

$$W_i = E \cdot I = 10^{-8} \frac{N_c \cdot n \cdot \psi \cdot \pi \cdot D \cdot L_m \cdot B_e}{120 \cdot a} \cdot I$$

Lembrando que: $A = \frac{I_a \cdot N_c}{\pi \cdot D} = \frac{I \cdot N_c}{2 \cdot a \cdot \pi \cdot D}$

resulta: $I = \frac{A \cdot 2 \cdot a \cdot \pi \cdot D}{N_c}$

Substituindo este valor na equação de W_i obtém-se:

$$W_i = 10^{-8} \frac{N_c \cdot n \cdot \psi \cdot \pi \cdot D \cdot L_m \cdot B_e}{120 \cdot a} \cdot \frac{A \cdot 2 \cdot a \cdot \pi \cdot D}{N_c} =$$

$$= \left[10^{-8} \frac{\pi^2}{60} \psi \cdot A \cdot B_e \right] \cdot D^2 \cdot L_m \cdot n$$

$$\text{de onde: } D^2 \cdot L_m = \frac{W_i}{n} \left[\frac{10^8 \cdot 60}{\pi^2 \cdot \psi \cdot A \cdot B_e} \right]$$

$$\text{o fator } \left[\frac{10^8 \cdot 60}{\pi^2 \cdot \psi \cdot A \cdot B_e} \right] = C$$

denomina-se coeficiente de utilização. A fórmula que permite calcular o fator $D^2\ L_m$ transforma-se em:

$$D^2 \cdot L_m = \frac{W_i}{n} \cdot C$$

Os valores dos coeficientes de utilização das máquinas de corrente contínua estão contidos na tabela da Fig. 126.

Ao produto $D^2\ L_m$, por ser expresso em cm^3, dá-se o nome de fator volumétrico, e indica-se com a letra M. Assim sendo:

$$M = \frac{W_i}{n} \cdot C$$

A potência W_i representa a potência produzida internamente pela máquina, que é superior à potência W que a máquina fornece ao circuito externo, resultando

$$W_i = \frac{W}{\mu} .$$

COEFICIENTE DE UTILIZAÇÃO C EM FUNÇÃO DE W/n (W/r.p.m) E DA VELOCIDADE PERIFÉRICA EM m/seg

	$v = m/seg$								
W/r.p.m	10	12	14	16	18	20	25	30	40
2	1210	1185	1163	1142	1120	1100	1060	1030	1000
5	935	918	900	885	865	850	820	800	775
10	780	778	764	750	735	720	695	685	665
20	670	660	645	635	620	610	590	575	555
30	605	594	582	572	560	550	530	515	500
40	550	540	530	520	510	500	482	470	455
50	530	520	510	500	490	480	463	450	436
100	428	422	414	406	398	390	377	366	355
150	352	348	339	333	327	320	308	300	290
200	286	280	276	270	265	260	250	244	236
300	280	274	270	264	259	254	245	238	231
400	273	268	263	258	253	248	240	234	226
500	266	261	256	252	247	242	233	227	220
700	262	257	252	248	242	238	230	224	216
1000	257	252	248	243	238	234	226	220	213
1500	253	249	244	239	234	230	222	215	209
2000	248	244	239	235	230	226	218	212	205
3000	246	242	237	233	229	224	216	210	204
4000	244	240	235	231	227	222	214	208	202
5000	242	238	233	229	223	220	212	206	200
7000	240	236	231	227	222	218	208	204	197
10000	238	234	229	225	220	216	210	202	196

Fig. 126

O valor do rendimento μ é dado pela tabela da Fig. 121. Calculado M, determina-se o valor do diâmetro do induzido com base no fator $\frac{W}{n}$, com ajuda da tabela da Fig. 122 e calcula-se o comprimento magnético do induzido, que resulta:

$$L_m = \frac{M}{D^2}$$

O comprimento magnético calculado deve satisfazer à seguinte relação:

$$0{,}5 \leqq \frac{L_m}{\tau} \leqq 1$$

83 — Exemplos de cálculo de um dínamo

Dados:

Potência nominal	W = 100 kW
Tensão	V = 125 volts
Rotações	n = 500 r.p.m

Tipo de excitação: em derivação provida de pólos auxiliares (Fig. 127).

Solução:

A) *Determinação do diâmetro, comprimento do induzido e número de pólos.*

A relação

$$\frac{W}{n} = \frac{100\,000}{500} = 200$$

Da tabela da Fig. 122 em correspondência com $\frac{W}{n} = 200$ resulta D = 58 cm. Com este diâmetro a velocidade periférica resulta:

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 0{,}58 \cdot 500}{60} = 15{,}16 \text{ m/seg}$$

Na tabela da Fig. 126, a esta velocidade periférica, por W/n = 200, corresponde o coeficiente de utilização C = 273.

DÍNAMO – 100 kW, 125 V, 500 r.p.m

Excitação: derivação

Todas as medidas em mm

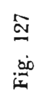


Fig. 127

Sendo a potência nominal da máquina $W = 100$ kW, da Fig. 121 resulta que o rendimento pode ser considerado $\mu = 0{,}89$, resultando a potência interna:

$$W_i = \frac{100}{0{,}89} = 112{,}36 \text{ kW} = 112\,360 \text{ watts.}$$

O fator volumétrico é dado por

$$M = \frac{W_i}{n}\, C = \frac{112\,360}{500} \cdot 273 = 61\,348$$

de onde

$$L_m = \frac{M}{D^2} = \frac{61\,348}{58^2} = 18{,}3 \text{ cm}$$

Da tabela indicada na Fig. 122 resulta que para $W/n = 200$ devem ser adotados seis pólos, isto é, $2p = 6$.

O passo polar é $\tau = \dfrac{\pi \cdot D}{2p} = \dfrac{3{,}14 \cdot 58}{6} = 30{,}35$ cm

A relação $\dfrac{L_m}{\tau} = \dfrac{18{,}3}{30{,}35} = 0{,}60$, aceitável, conforme parágrafo 82.

B) *Determinação do fluxo magnético* — Para que o induzido tenha comprimento magnético $L_m = 18{,}3$ cm, o comprimento do pacote laminado deve resultar $18{,}3 \cdot 1{,}1$. Executando o induzido com dois canais de ventilação de 1 cm, o comprimento total do mesmo resulta:

$$L = 18{,}3 \cdot 1{,}1 + 2 = 22{,}13$$

A carcaça do induzido será fabricada conforme Fig. 128, de onde resulta:

$$L_m = (23 - 2)/1{,}1 = 19 \text{ cm}$$

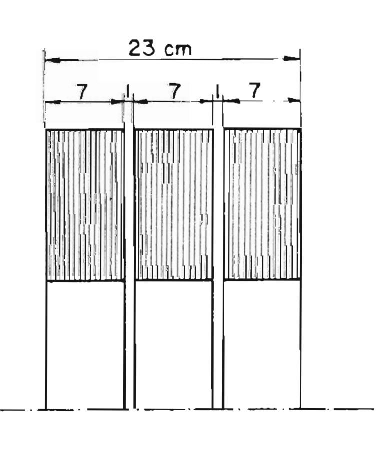


Fig. 128

O comprimento axial da expansão polar é igual ao comprimento geométrico do induzido, isto é, 23 cm. A relação entre o arco da expansão e o passo polar, conforme parágrafo 76, deve ser considerada $\psi = 0{,}65$. Assim sendo, se a expansão for feita com lâminas de 1 mm de espessura, sua seção periférica resulta:

$$S_p = L \cdot \psi \cdot \tau \cdot 0{,}95 = 23 \cdot 0{,}65 \cdot 30{,}35 \cdot 0{,}95 = 431 \text{ cm}^2$$

Da tabela da Fig. 122 escolhe-se o valor da indução na superfície periférica da expansão $B_e = 9000$; de onde o fluxo resulta:

$$\phi = S_p \cdot B_e = 431 \cdot 9000 = 388 \cdot 10^4$$

C) *Enrolamento induzido* — Conforme indica o parágrafo 43, a f.e.m. a ser gerada na máquina é:

$$E = \sim 1{,}05 \ V = 1{,}05 \cdot 125 = \sim 131 \text{ volts}$$

A corrente fornecida pela máquina é:

$$I = \frac{W}{V} = \frac{100\,000}{125} = 800 \text{ ampères}$$

Em vista do valor elevado da corrente, executa-se o enrolamento induzido imbricado, como $2a = 6$. Acrescentando-se a corrente fornecida ao circuito de excitação, em cada via interna do induzido circulará

$$I_a = \frac{800 \cdot 1{,}02}{6} = 136 \text{ ampères}$$

O número provável de condutores induzidos resulta:

$$N_c = \frac{10^8 \cdot E \cdot 60}{n \cdot \phi} = \frac{10^8 \cdot 131 \cdot 60}{500 \cdot 388 \cdot 10^4} = 405$$

Executando-se o enrolamento com barra, de forma que resulte uma espira em cada bobina e colocando 6 condutores por ranhura, o número das ranhuras resulta:

$$N_R = \frac{405}{6} = 67{,}5.$$

Executa-se o induzido com 68 ranhuras. O número efetivo dos condutores é $68 \cdot 6 = 408$ e o número das lâminas no comutador é $Z = 408/2 = 204$.

Sendo o enrolamento imbricado, os passos do mesmo são:

$$Y_1 = \frac{F}{2p} - 1 = \frac{408}{6} - 1 = 67; \; Y_n = \frac{y_1\text{-}1}{m} = \frac{67\text{-}1}{6} = 11 \text{ ranhuras}$$

$$Y_2 = \frac{F}{2p} + 1 = 69$$

A profundidade da ranhura, conforme tabela da Fig. 122, por $W/n = 200$, resulta $h_R = \sim 38$ mm.

Sendo a corrente em cada via interna $I_a = 136$ A e escolhendo-se na tabela da Fig. 96, por $v = 15$, 16 m/seg $\delta = 4{,}1$ A/mm², a seção dos condutores resulta:

$$S_c = \frac{I_a}{\delta} = \frac{136}{4{,}1} = 33{,}1 \text{ mm}^2$$

Usa-se o condutor de $14 \times 2{,}4$ mm, que em vista dos cantos arredondados pode ser considerado possuidor da seção $S_c = 33{,}1$ mm².

O revestimento do condutor é feito com cadarço de 0,2 mm de espessura, o qual ao ser enrolado sobrepõe-se somente uma vez. Assim sendo, a espessura do revestimento de cada lado resulta 0,4 mm.

Os três condutores da camada superior são isolados dos da camada inferior por meio de um diafragma de "prespan" de 0,8 mm de espessura. O isolamento da ranhura também é feito com "prespan" de 0,8 mm de espessura.

A disposição dos condutores e do respectivo isolamento na ranhura é feito conforme Fig. 129.

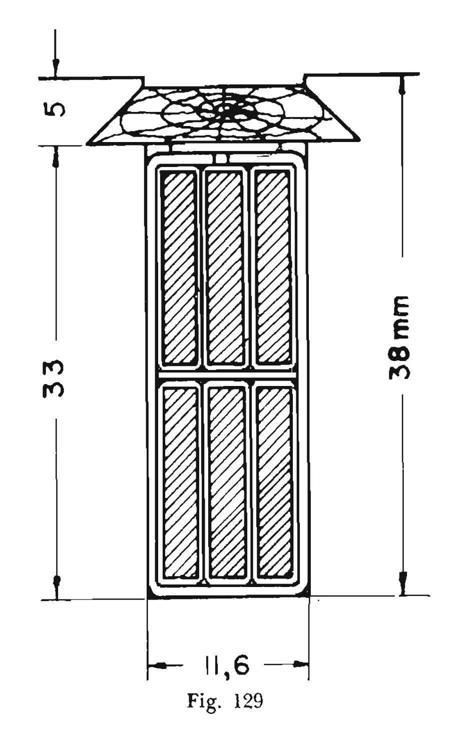


Fig. 129

Largura da ranhura			*Profundidade da ranhura*		
Condutores	$3 \times 2{,}4 =$	7,2 mm	Condutores	$2 \times 14 =$	28,0 mm
Algodão	$6 \times 0{,}4 =$	2,4 mm	Algodão	$4 \times 0{,}4 =$	1,6 mm
Prespan	$2 \times 0{,}8 =$	1,6 mm	Prespan	$3 \times 0{,}8 =$	2,4 mm
Folga	$=$	0,4 mm	Prespan embaixo da cepa	$=$	0,6 mm
			Folga	$=$	0,4 mm
	$b_R =$	11,6 mm		$h_R =$	33,0 mm

Passo às ranhuras na periferia do rotor,

$$\tau_R = \frac{\pi \cdot D}{N_R} = \frac{3{,}14 \cdot 58}{68} = 2{,}67 \text{ cm} = 26{,}7 \text{ mm}$$

Espessura da cabeça do dente $b' = 26{,}7 - 11{,}6 = 15{,}1 \text{ mm} = 1{,}51 \text{ cm}$

Passo às ranhuras na base do dente

$$\tau'_R = \frac{\pi \cdot (D - 2 \cdot h_R)}{N_R} = \frac{3{,}14 \ (58 - 2 \cdot 3{,}8)}{68} = 2{,}32 \text{ cm} = 23{,}2 \text{ mm}$$

Espessura da base do dente $b'' = 23{,}2 - 11{,}6 = 11{,}6 \text{ mm} = 1{,}16 \text{ cm}$

$$\text{Número de dentes por pólo} = \frac{68}{6} = 11{,}3$$

Número de dentes embaixo de uma expansão polar

$$X_d = 11{,}3 \cdot 0{,}65 = 7{,}34$$

Seção dos dentes na base

$$S'_d = (b'' \cdot L_m) \ X_d = (1{,}16 \cdot 19) \ 7{,}34 = 162 \text{ cm}^2$$

Indução na base dos dentes =

$$= \frac{\phi}{S'_d} = \frac{388 \cdot 10^4}{162} = 24\,000$$

Este valor é aceitável, conforme parágrafo 74. Desejando-se um valor menor da indução na base dos dentes, é preciso aumentar o comprimento do induzido e diminuir, em proporção, a indução na superfície periférica da expansão polar. Efetuando-se tal modificação, o custo da máquina resulta mais elevado.

O comprimento do fio enrolado no induzido resulta:

$$L_f = (2L + 2{,}8\ \tau)\ N_s = (2 \cdot 23 + 2{,}8 \cdot 30{,}35)\ 204 = 26\ 720\ \text{cm} = 267{,}2\ \text{m}$$

$$R_f = \frac{10^{-2} \cdot \rho \cdot L_f}{S} = \frac{0{,}0216 \cdot 267{,}2}{33{,}1} = 0{,}1743\ \text{ohms}$$

$$R_i = \frac{R_f}{(2a)^2} = \frac{0{,}1743}{6^2} = 0{,}00484\ \text{ohms.}$$

Queda de tensão por resistência =

$$= R_i I = 0{,}00484\ (800 \cdot 1{,}02) = 3{,}95\ \text{volts.}$$

Perda por efeito joule

$$W_{cu} = R_i \cdot I^2 = 0{,}00484 \cdot (800 \cdot 1{,}02)^2 = 3222\ \text{watts.}$$

A densidade linear periférica

$$A = \frac{N_c \cdot I_a}{D} = \frac{408 \cdot 136}{3{,}14 \cdot 58} = 305\ N_c I/\text{cm}$$

D) *Comutador* — Conforme parágrafo 28, escolhe-se o diâmetro do comutador igual a:

$$D_c = 0{,}65 \cdot D = 0{,}65 \cdot 58 = 37{,}7\ \text{cm} = \sim 40\ \text{cm}$$

A velocidade periférica do mesmo é

$$v_c = \frac{\pi \cdot D_c \cdot n}{60} = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}40 \cdot 500}{60} = 10{,}46\ \text{m/seg}$$

O passo ao comutador é:

$$\tau_c = \frac{\pi \cdot D_c}{Z} = \frac{3{,}14 \cdot 400}{204} = 6{,}15\ \text{mm}$$

Sendo a espessura da mica 1 mm, a espessura da lâmina na superfície de trabalho é 6,15 − 1 = 5,15 mm.

Usam-se escovas de carvão-grafita que, conforme Fig. 41, admitem a densidade de corrente $\delta_e = 8$ amp/cm²; pressão específica de 170 g/cm² e coeficiente de atrito 0,2.

A superfície das escovas de uma polaridade resulta:

$$S = \frac{I}{\delta_e} = \frac{800 \cdot 1{,}02}{8} = 102 \text{ cm}^2$$

Sobre o coletor se apóiam 6 fileiras de escovas (3 positivas e 3 negativas). Escolhendo a largura da escova igual a três passos ao comutador τ_c, isto é, $E_{es} = 3 \cdot 6{,}15 = 18{,}5$ mm.

O comprimento total das escovas numa fileira resulta:

$$l_F = \frac{S}{3 \cdot E_{es}} = \frac{102}{3 \cdot 1{,}85} = 18{,}4 \text{ cm} = 184 \text{ mm}$$

Em cada fileira usam-se 8 escovas com comprimento axial de 2,5 cm.

Considerando-se de 6 mm o espaçamento entre uma escova e a outra e de 10 mm com a extremidade da superfície de trabalho, o comprimento axial do comutador resulta:

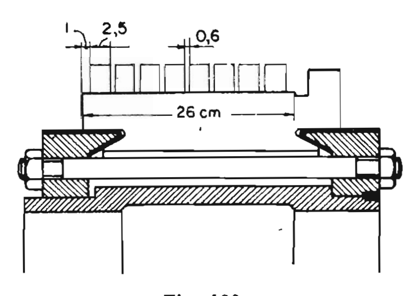


Fig. 130

$$l_c = 8 \cdot 2{,}5 + 7 \cdot 0{,}6 + 2 \cdot 1 = \sim 26 \text{ cm}$$

Sobre o comutador se apóiam $6 \cdot 8 = 48$ escovas de: $1{,}85 \cdot 2{,}5 = 4{,}6$ cm². A pressão específica que atua sobre as mesmas é 170 g/cm², isto é, 0,17 kg/cm². O coeficiente de atrito é 0,2 e a queda de tensão por pares de escovas é 1,3 volts.

As perdas por atrito entre as escovas e o comutador, conforme parágrafo 32, resultam:

$$W_a = 9{,}81 \cdot p \cdot a \cdot s \cdot v = 9{,}81 \cdot 0{,}17 \cdot 0{,}2 \ (48 \cdot 4{,}6) \ 10{,}46 = 770 \text{ watts.}$$

As perdas por queda de tensão no contato escovas-comutador são:

$$W_{cv} = \Delta V \cdot I = 1{,}3 \cdot (800 \cdot 1{,}02) = 1060 \text{ watts.}$$

As perdas totais no comutador resultam:

$$W_c = W_a + W_{cv} = 770 + 1060 = 1830 \text{ watts.}$$

A superfície de irradiação do comutador em dm² é:

$$S_c = \pi \cdot D_c \cdot L_c = 3{,}14 \cdot 4 \cdot 2{,}6 = 32{,}65 \text{ dm}^2$$

Na tabela da Fig. 46, para $v_c = 10{,}46$ m/seg corresponde $K = 1{,}70$. A elevação de temperatura do comutador, conforme parágrafo 33, resulta:

$$\Delta T = \frac{W_c}{S_c \cdot K} = \frac{1830}{32{,}65 \cdot 1{,}7} = \sim 33^oC.$$

Esta elevação é baixa, pois no caso do comutador a elevação aceitável é de 60°C, conforme parágrafo 33.

A tensão entre duas lâminas adjacentes, conforme parágrafo 29, resulta:

$$\Delta v = \frac{E}{Z/2p} = \frac{2p \cdot E}{Z} = \frac{6 \cdot 131}{204} = 3{,}85 \text{ volts.}$$

A máxima tensão aceitável entre lâminas é: 16 volts, conforme parágrafo 29.

E) *Entreferro* — O comprimento do entreferro, na zona central do pólo, conforme parágrafo 80, resulta:

$$l_e = \sim 0{,}5 \frac{A \cdot \tau}{B_e} = 0{,}5 \frac{305 \cdot 30{,}35}{9000} = 0{,}515 \text{ cm} = \sim 0{,}52 \text{ cm}$$

F) *Cálculo das dimensões dos pólos e da expansão polar* — O pólo é constituído por chapa de ferro normal com a espessura de 1 mm, resultando o coeficiente de enchimento 0,95. O comprimento axial do pólo é igual ao do induzido, isto é, 23 cm. A altura do pólo depende da altura da bobina de excitação. A altura desta última é fornecida pela tabela da Fig. 118, resultando $h_a = 16$ cm. Executa-se o pólo com a altura $l_n = 20$ cm. A altura da expansão polar é 2,98 cm.

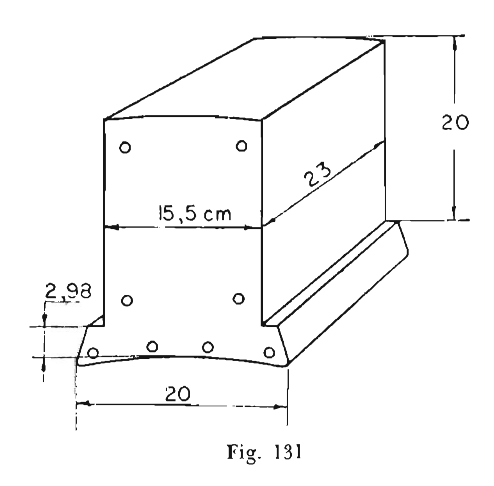


Fig. 131

A largura do pólo é obtida da tabela da Fig. 124, resultando $E_p = 15{,}5$ cm. As dimensões do pólo, portanto, são as indicadas na Fig. 131. A seção do núcleo é

$$S_n = 15{,}5 \cdot 23 \cdot 0{,}95 = 338 \text{ cm}^2$$

Considerando-se o coeficiente de dispersão 1,25, o fluxo no pólo resulta:

$$\phi_n = \phi \cdot 1{,}25 = 388 \cdot 10^4 \cdot 1{,}25 = 485 \cdot 10^4 \text{ maxwell}$$

A respectiva indução é $B_n = \dfrac{\phi_n}{S_n} = \dfrac{485 \cdot 10^4}{338} = 14\,350$, valor aceitável, conforme parágrafo 74.

O comprimento do arco da expansão pode ser considerado igual à corda, isto é,

$$0{,}65\ \tau = 0{,}65 \cdot 30{,}35 = 19{,}73 \text{ cm} = \sim 20 \text{ cm}$$

A seção da expansão polar é considerada como sendo a média aritmética entre a sua periferia e a seção do núcleo, isto é,

$$S'_e = \frac{S_n + S_p}{2} = \frac{338 + (20 \cdot 23 \cdot 0{,}95)}{2} = \frac{338 + 437}{2} = 388 \text{ cm}^2$$

O fluxo na expansão polar é considerado como sendo a média aritmética entre o fluxo na superfície periférica da expansão polar e o fluxo no núcleo polar, isto é,

$$\phi_{exp} = \frac{\phi_e + \phi_n}{2} = \frac{388 \cdot 10^4 + 485 \cdot 10^4}{2} = 437 \cdot 10^4 \text{ maxwell}$$

G) *Espessura e diâmetro externo da carcaça estatórica* — Na carcaça estatórica existe a metade do fluxo do núcleo polar, isto é:

$$\phi_c = \phi_n/2 = 485 \cdot 10^4/2 = \sim 243 \cdot 10^4 \text{ maxwell}$$

Considerando-se a indução na carcaça estatórica de 10 000 gauss, a seção da mesma resulta:

$$S_c = \frac{\phi_c}{10^4} = \frac{243 \cdot 10^4}{10^4} = 243 \text{ cm}^2$$

Se o comprimento axial da carcaça for

$L_c = 30$ cm, a espessura da mesma resulta:

$$\frac{243}{30} = 8{,}1 \text{ cm.}$$

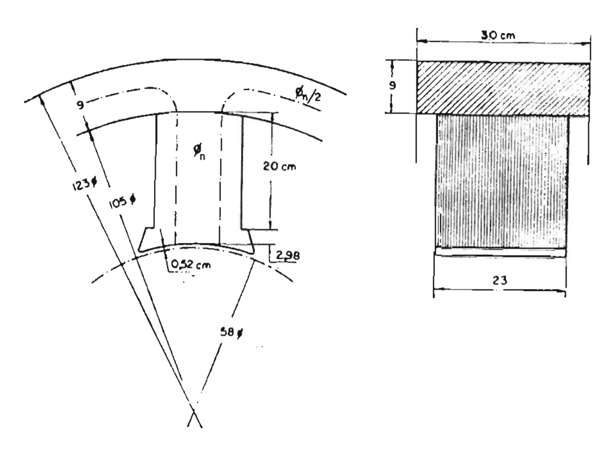


Fig. 132

A fim de aumentar sua resistência mecânica, a carcaça é executada com 9 cm de espessura, resultando o diâmetro externo da mesma:

$$D_c = 58 + 2\ (0{,}52 + 2{,}98 + 20 + 9) = 123 \text{ cm}$$

A seção real da carcaça é $30 \cdot 9 = 270$ cm²

O comprimento do circuito magnético na carcaça estatórica resulta:

$$l_c = \frac{\pi \cdot (105 + 9)}{6} = 59{,}66 = \sim 60 \text{ cm}$$

H) *Espessura e diâmetro interno da carcaça induzida* — O fluxo magnético do entreferro divide-se no induzido em duas partes; assim sendo, o fluxo existente na carcaça induzida é

$$\phi_i = \phi_e/2 = 388 \cdot 10^4/2 = 194 \cdot 10^4 \text{ maxwell.}$$

Considerando-se a indução na carcaça rotórica de 10 000 gauss, a seção da mesma deve ser:

$$S_i = \frac{\phi_i}{10^4} = \frac{194 \cdot 10^4}{10^4} = 194 \text{ cm}^2$$

A espessura da carcaça resulta:

$$\frac{S_i}{L_m} = \frac{194}{19} = \sim 10 \text{ cm}$$

Executa-se com 12 cm a fim de obter-se maior estabilidade mecânica.

O diâmetro interno do induzido resulta:

$$d_i = 58 - 2\ (3{,}8 + 12) = = 26{,}4 \text{ cm}$$

A seção real da carcaça rotórica é:

$$S_i = 12 \cdot 19 = 228 \text{ cm}^2$$

O comprimento do circuito magnético na carcaça induzida resulta:

$$l_i = \frac{(26{,}4 + 12) \cdot \pi}{6} = \sim 20 \text{ cm}$$

I) *Cálculo da seção média dos dentes e do entreferro.*

A espessura média do dente é:

$$\frac{1{,}51 + 1{,}16}{2} = 1{,}335 \text{ cm}$$

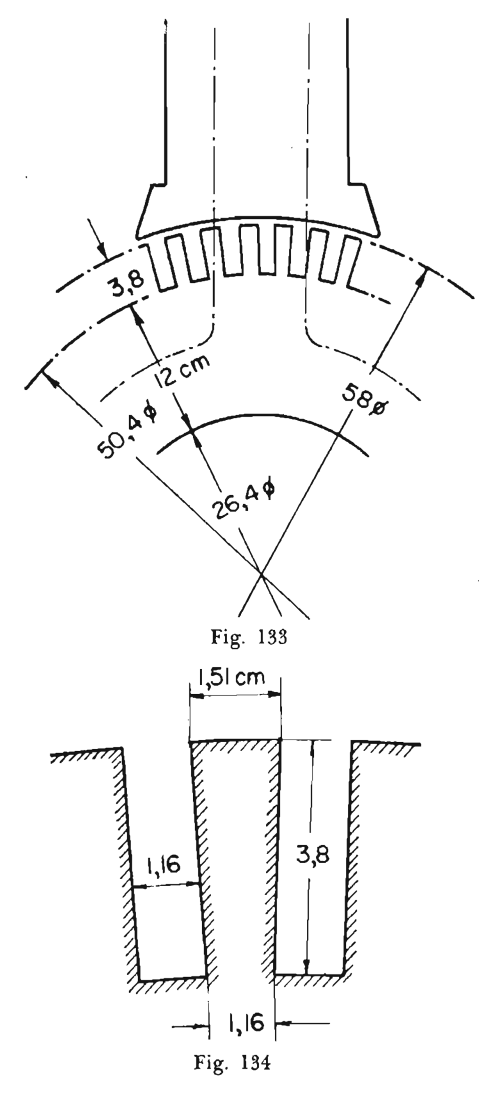


Fig. 133

Fig. 134

Sendo $L_m = 19$ cm, a seção média de um dente resulta

$$1{,}335 \cdot 19 = 25{,}365 \text{ cm}^2$$

No item C foi visto que embaixo de cada expansão polar há 7,34 dentes. Assim sendo a seção dos dentes embaixo de uma expansão polar resulta:

$$S_d = 25{,}365 \cdot 7{,}34 = 186 \text{ cm}^2$$

A seção do entreferro deve ser considerada como sendo a média aritmética entre a seção periférica da expansão polar $S_p = 20 \cdot 23 \cdot 0{,}95 = 437$ cm e a seção da cabeça dos dentes embaixo de uma expansão polar. Esta última resulta:

$$S_d' = b' \cdot L_m \cdot X_d = 1{,}51 \cdot 19 \cdot 7{,}34 = 210 \text{ cm}^2$$

A seção do entreferro resulta:

$$S_e = \frac{437 + 210}{2} = 323 \text{ cm}^2$$

J) *Característica de magnetização* – Com base nos valores calculados, pode-se traçar o esquema do circuito magnético dos pólos principais da máquina, representado na Fig. 135.

Reunindo-se todos os valores numa única tabela, conforme Fig. 136, e efetuando-se os cálculos conforme o livro *Eletrotécnica,* parágrafo 103, obtém-se o número de ampère-espiras que cada bobina do circuito de excitação em derivação deve gerar.

Tendo o enrolamento induzido sido executado com 408 condutores em lugar de 405, conforme foi calculado, o fluxo sofre uma pequena modificação. Assim sendo, para gerar a f.e.m. de 131 volts seu valor deve ser

$$\phi = \frac{10^8 \cdot E \cdot 60}{n \cdot N_c \cdot} = \frac{10^8 \cdot 131 \cdot 60}{500 \cdot 408} = 385 \cdot 10^5 \text{ maxwell.}$$

A fim de compensar o efeito da distorção do fluxo, aumenta-se o **valor das ampère-espiras obtido na tabela, da quantidade correspondente a 10% das ampère-espiras produzidas em cada circuito magnético induzido, que resulta:**

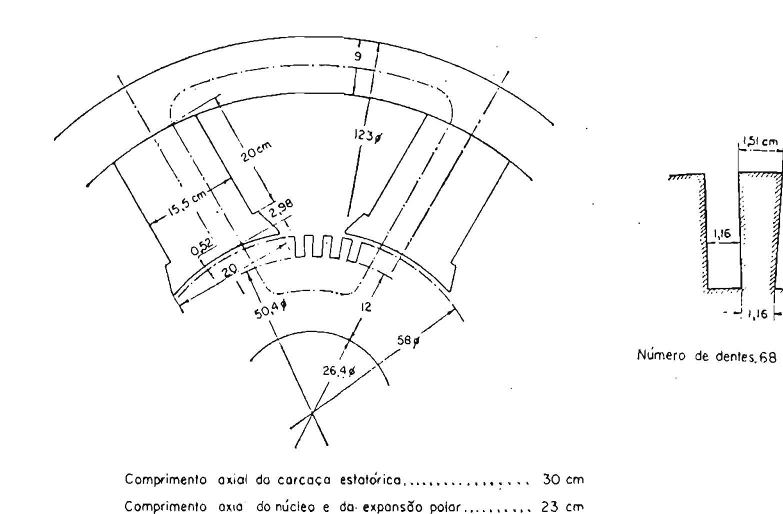
$$2X = A \cdot \tau = 305 \cdot 30{,}35 = 9257$$

O número de ampère-espiras magnetizantes por pares de pólo resúlta:

$$2\ A_e = 13\,915 + (9257 \cdot 0{,}1) = 14\,841$$

O número de ampère-espiras por pólo, em correspondência da carga normal, resulta:

$$A_e = \frac{14\,841}{2} = 7421$$



Comprimento axial da carcaça estatórica .... 30 cm

Comprimento axial do núcleo e da expansão polar .... 23 cm

Comprimento magnético do induzido .... 19 cm

Fig. 135

Parte do circuito e material	*Fluxo (maxwell)*	*Seção (cm^2)*	*Indução (gauss)*	*Aec.*	*Comprimento (cm)*	*(Aec. l)*
Carcaça estat. (Aço fundido)	$242 \cdot 10^4$	270	9000	3,2	60	192
Núcleo Polar (Fe lam.)	$481 \cdot 10^4$	338	14200	14,5	40	580
Expansão polar (Fe lam.)	$433 \cdot 10^4$	388	11160	6,6	5,96	40
Entreferro (ar)	$385 \cdot 10^4$	323	11919	9535	1,04	9916
Dentes induz. (Fe lam.)	$385 \cdot 10^4$	186	20700	412	7,6	3131
Carcaça induz. (Fe lam.)	$193 \cdot 10^4$	228	8500	2,8	20	56
Ampère-espiras por pares de pólos relativos a 131 volts = 13915						

Fig. 136

E	60	80	100	110	120	130	140	150	160
ϕ	$1765 \cdot 10^3$	$235 \cdot 10^4$	$294 \cdot 10^4$	$324 \cdot 10^4$	$353 \cdot 10^4$	$383 \cdot 10^4$	$421 \cdot 10^4$	$412 \cdot 10^4$	$471 \cdot 10^4$
Ae por pólo	2369	3215	4093	4697	5444	6685	8598	10949	14115

Fig. 137

Executando-se o mesmo cálculo apresentado na Fig. 136, para diferentes valores da tensão a vazio, obtêm-se os resultados indicados na Fig. 137.

Com os valores registrados na tabela da Fig. 137, pode-se traçar a característica de magnetização da máquina, indicada na Fig. 138.

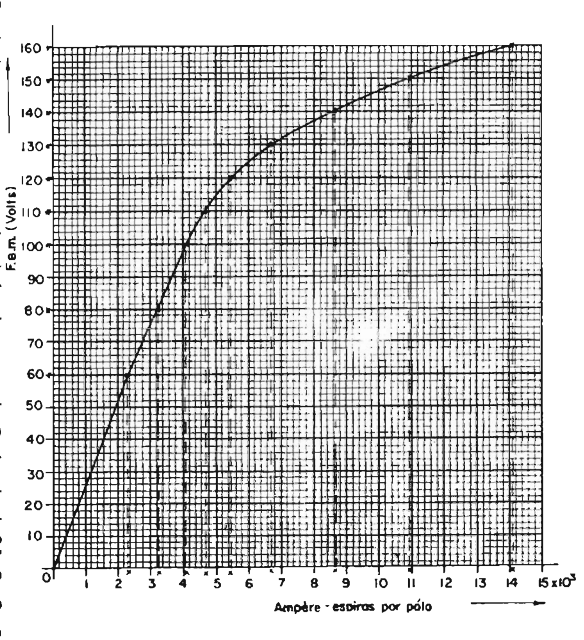


Fig. 138

K) *Perdas no induzido e aquecimento do mesmo* — As perdas por efeito joule foram calculadas no item C, tendo resultado $W_J = 3222$ watts. A seguir serão calculadas as perdas no ferro e o aquecimento do induzido.

— Volume da coroa do induzido =

$$= \frac{\pi \cdot (50{,}4^2 - 26{,}4^2)}{4} \cdot 19 = 27\,500 \text{ cm}^3$$

— Peso da coroa =

$$= 27\,500 \cdot 7{,}8 = 214\,500 \text{ g} = 214{,}5 \text{ kg}$$

— Volume dos dentes =

$$= \frac{1,51 + 1,16}{2} \cdot 3,8 \cdot 19 \cdot 68 = 6554 \text{ cm}^3$$

— Peso dos dentes =

$$= 6554 \cdot 7,8 = 51\,121 \text{ g} = 51,121 \text{ kg}$$

— Freqüência da variação do fluxo

$$f = \frac{n \cdot p}{60} = \frac{500 \cdot 3}{60} = 25 \text{ Hz}$$

Com carga normal, a indução média dos dentes é 20 700 gauss, enquanto na carcaça induzida a indução é 8500. Para estas duas induções e freqüência $f = 25$ Hz, da tabela da Fig. 81 ou da curva da Fig. 82 resulta:

Perda específica nos dentes $w_d = 6,3$ watt/kg
Perda específica na carcaça $w_c = 1$ watt/kg

Perdas nos dentes $= P_d \cdot w_d \cdot 1,25 = 51,121 \cdot 6,3 \cdot 1,25 = 403$ watts
Perdas na coroa $= P_c \cdot w_c \cdot 1,25 = 214,5 \cdot 1 \cdot 1,25 = 268$ watts
Perda total no induzido $= 3222 + 403 + 268 = 3893$ watts
A superfície total de irradiação compõe-se de:
Superfície cilíndrica externa $= \pi \cdot 58 \cdot 23 = 4188 \text{ cm}^2 = 0,4188 \text{ m}^2$
Superfície cilíndrica interna $= \pi \cdot 26,4 \cdot 23 = 1907 \text{ cm}^2 = 0,1907 \text{ m}^2$
Superfícies laterais e canais =

$$= 4 \cdot \frac{\pi}{4} (58^2 - 26,4^2) = 8374 \text{ cm}^2 = 0,8374 \text{ m}^2$$

Superfície total de irradiação $= 1,4469 \text{ m}^2$

$$W/m^2 = \frac{W_i}{S_t} = \frac{3893}{1,447} = 2690$$

A elevação de temperatura do induzido é dada por:

$$\Delta T = \frac{W/m^2}{K}$$

Da tabela da Fig. 97, em correspondência com a velocidade periférica do induzido $v = 15,16$ m/seg resulta $K = 67,5$, de onde

$$\Delta T = \frac{2690}{67,5} = \sim 40^\circ\text{C}$$

Esta temperatura é aceitável, pois a máxima temperatura admissível no induzido é de 55°C.

L) *Dimensões dos pólos auxiliares* — A fim de complementar as informações relativas à máquina que está sendo projetada calcula-se o valor da f.e.m. de comutação e_c que deve ser produzida nas espiras curto-circuitadas, pelos pólos auxiliares, conforme parágrafo 54.

$$e_c = 2 \cdot N_z \cdot A \cdot v \cdot L_m \cdot K \cdot 10^{-8}$$

Escolhendo-se K = 7 e sendo v = 1516 cm/seg, resulta:

$$e_c = 2 \cdot 1 \cdot 305 \cdot 1516 \cdot 19 \cdot 7 \cdot 10^{-8} = 1{,}23 \text{ volts}$$

As dimensões dos pólos auxiliares são calculadas conforme parágrafos 56 e 57. A largura da expansão polar dos mesmos é dada pela seguinte fórmula:

$$l_{ca} = l'_{es} + \left[\frac{m}{2} (1 + u) - \frac{a}{p} \right] \tau_c$$

$$\text{na qual } u = \frac{N_R}{2p} - \frac{Y_1}{m} = \frac{68}{6} - \frac{67}{6} = 0{,}144$$

Substituindo-se os valores correspondentes, obtém-se:

$$l_{ea} = 18{,}5 \frac{58}{40} + \left[\frac{6}{2} (1 + 0{,}144) - \frac{3}{3} \right] \times$$

$$\times 6{,}15 \frac{58}{40} = 26{,}8 + 21{,}69 = 48{,}49 \text{ mm}$$

Executa-se a expansão com 5 cm de largura.

O pólo auxiliar adquire a forma indicada na Fig. 139.

A largura do núcleo de 3,2 cm é a mínima admissível pela estabilidade mecânica e pelo diâmetro dos parafusos de fixação.

O comprimento axial do pólo auxiliar é igual ao do induzido, isto é, 23 cm.

O comprimento do entreferro, embaixo do pólo auxiliar, sendo $N_z = 1$, pode ser escolhido entre 4 e 8 mm. Assim sendo, sua escolha recai no valor $d_c = 0{,}52$ cm, isto é, igual ao do entreferro existente embaixo do pólo principal.

O valor da indução no entreferro, capaz de produzir a f.e.m. de comutação, é dado por $B_c = K.A$, onde se escolhe K = 5,5 e resulta:

$$B_c = 5{,}5 \cdot 305 = 1677 \text{ gauss}$$

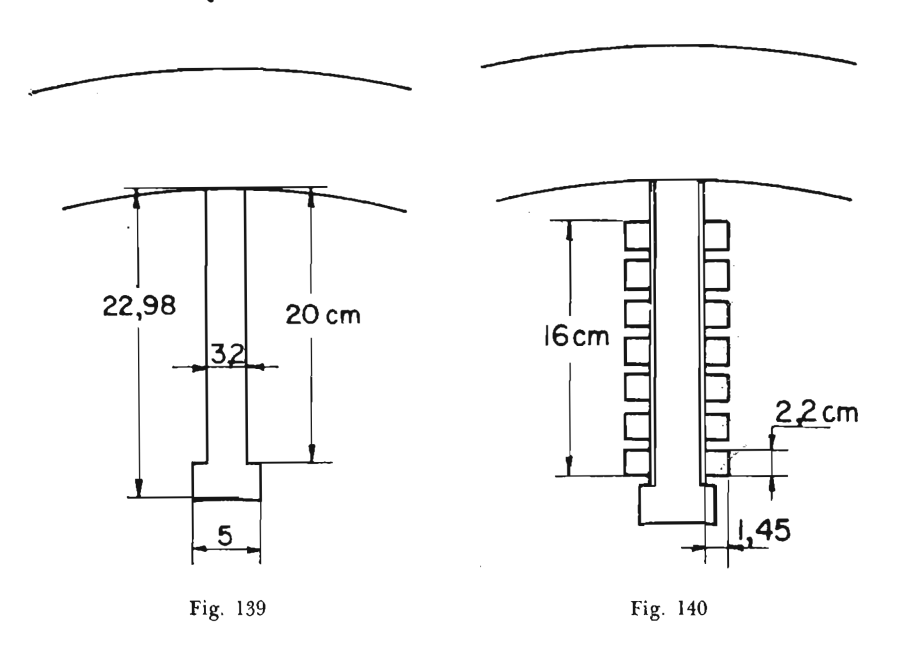


Fig. 139

Fig. 140

As ampère-espiras de cada pólo auxiliar, necessárias para gerar a f.e.m. de comutação, resultam:

$$NI_c = 1{,}12 \cdot B_c \cdot d_c = 1{,}12 \cdot 1677 \cdot 0{,}52 = 976$$

As ampère-espiras de cada pólo auxiliar, necessárias a compensar a reação do induzido, são:

$$X_t = \frac{\tau_p \cdot A}{2} = \frac{30{,}35 \cdot 305}{2} = 4628$$

As ampère-espiras necessárias a cada pólo auxiliar resultam:

$$NI_{au} = X_t + NI_c = 4628 + 976 = 5604$$

Sendo os pólos auxiliares excitados em série, a corrente que os atravessa é $I = 800$ ampères, por isso o número de espiras em cada um deles deve ser:

$$N_{au} = \frac{NI_{au}}{I} = \frac{5604}{800} = 7 \text{ espiras.}$$

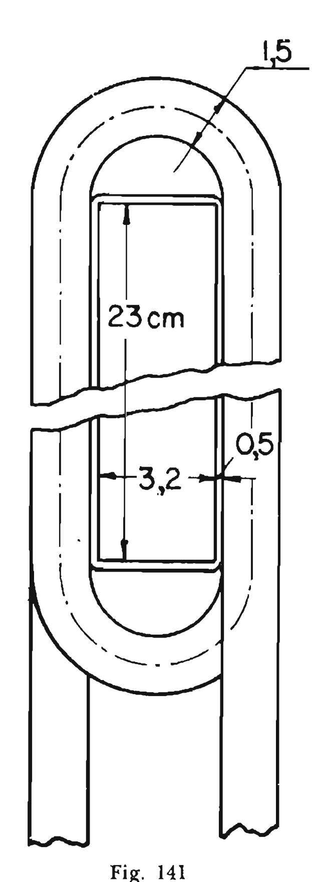


Fig. 141

Se a densidade de corrente for fixada em 2,5 amp/mm², conforme parágrafo 59, a seção do condutor resulta:

$$S_{au} = \frac{800}{2,5} = 320 \text{ mm}^2$$

Esta seção é muito grande para se usar um condutor maciço. Desejando-se usá-lo, entretanto, o mesmo deve ter as seguintes dimensões: 22 × 14,5 mm.

Sua forma, quando enrolado, é a representada na Fig. 141. Em substituição ao condutor maciço pode ser usado o constituído por 5 lâminas de 22 × 2,9 mm, conforme Fig. 142.

Considerando-se de 1 mm o isolamento do condutor, a altura total do enrolamento resulta:

$$h_e = (22 + 1)\ 7 = 161 \text{ mm} = 16 \text{ cm aprox.}$$

O comprimento médio de cada espira é:

$$l_m = 2 \cdot 23 + \pi \cdot 5,8 = 64,2 \text{ cm} = 0,642 \text{ m}$$

O comprimento do condutor em cada pólo resulta:

$$l_c = 0,642 \cdot 7 = 4,494 \text{ m}$$

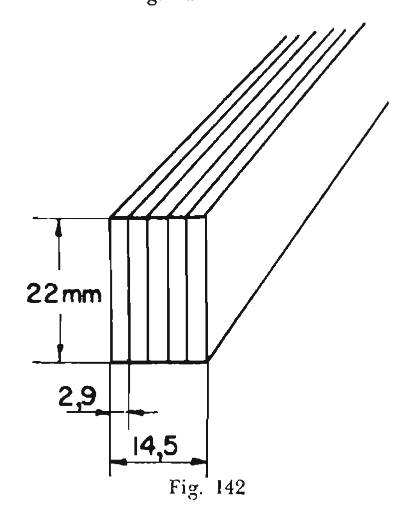


Fig. 142



O comprimento total do condutor enrolado resulta:

$$l_{pa} = 6 \cdot l_c = 6 \cdot 4,494 = 26,964 \text{ m}$$

A resistência do circuito dos pólos auxiliares resulta:

$$r_{pa} = \frac{\rho \cdot l}{S} =$$

$$= \frac{0,0216 \cdot 26,964}{320} =$$

$$= 0,00182 \text{ ohms}$$

Peso do cobre no circuito dos pólos auxiliares:

$$P_{cu} = S \cdot l \cdot 8{,}9 = 3{,}20 \cdot 2696{,}4 \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-3} = 77 \text{ kg aprox.}$$

Queda de tensão $\Delta V_{pa} = 0{,}00182 \cdot 800 = 1{,}45$ volts.
Perdas por efeito joule $= R \cdot I^2 = 0{,}00182 \cdot 800^2 = 1165$ watts.
A perda em watts em cada bobina resulta:

$$W_p = \frac{1165}{6} = 194$$

A superfície de irradiação de cada bobina resulta:

$$S = (2 \cdot 23 + \pi \cdot 7{,}3)\ 16 = 1100 \text{ cm}^2 = 0{,}11 \text{ m}^2$$

Resulta então:

$$W/m^2 = \frac{194}{0{,}11} = 1765$$

Escolhendo-se $K = 30$, conforme parágrafo 70, a elevação de temperatura da bobina resulta:

$$\Delta T = \frac{W/m^2}{K} = \frac{1765}{30} = 59^\circ C$$

Esta elevação de temperatura está dentro dos limites previstos pelas normas, pois, nas bobinas dos pólos auxiliares a elevação de temperatura admissível é de 60°C.

M) *Cálculo do enrolamento de excitação em derivação* — É possível agora calcular o verdadeiro valor da queda de tensão interna da máquina, pois resulta:

— do item "L", que a queda de tensão no circuito dos pólos auxiliares	$\Delta v_{pa} = 1{,}45$ volts.
— do item "D", que a queda de tensão no contato escovas-comutador	$= 1{,}3$ volts.
— do item "C", que a queda de tensão no induzido	$\Delta v_i = 3{,}95$ volts.
— A queda de tensão total	$\Delta v = 6{,}7$ volts.

Esta queda foi suposta, no item "C", de 5% da tensão nominal da máquina, ou seja, de 6 volts.

A f.e.m. induzida, na máquina, com carga normal deve ser portanto:

$$E = V + \Delta v = 125 + 6{,}7 = 131{,}7 \text{ volts.}$$

No projeto da máquina o valor da f.e.m. foi considerado de 131 volts. No item "J" foi visto que, tomando-se em consideração também a reação do induzido, a máquina funcionando com carga normal deve, em cada pólo principal, possuir 7421 ampère-espiras.

O enrolamento de excitação em derivação deve ser projetado de forma que a máquina possa produzir, em seus bornes, a tensão nominal, mesmo com uma sobrecarga de 25%. Neste regime de funcionamento resulta:

— A queda de tensão total:

$$\Delta v_{125} = 1{,}25 \cdot 6{,}7 = 8{,}38 \text{ volts.}$$

— A f.e.m. que deve ser gerada:

$$E_{125} = 125 + 8{,}38 = 133{,}38 \text{ volts.}$$

Da característica de magnetização obtém-se que a este valor de "E" correspondem a cada pólo principal 7250 ampère-espiras.

Quando a máquina trabalha em regime de sobrecarga (25%), as correspondentes ampère-espiras de reação do induzido para cada pólo resultam:

$$X_{125} = \frac{A_{125} \cdot \tau_p}{2} = \frac{305 \cdot 1{,}25 \cdot 30{,}35}{2} = 5830$$

Cada pólo da máquina deve possuir:

$$7250 + (5830 \cdot 0{,}1) = 7833 \text{ ampère-espiras}$$

Por motivo de segurança este número é aumentado de 10%, resultando:

$$NI_{125} = 7833 \cdot 1{,}1 = 8610 \text{ ampère-espiras aprox.}$$

A altura da bobina é obtida pela tabela da Fig. 118, na qual, em correspondência com $\tau = 30{,}35$ cm, resulta $h_a = 16$ cm.

Do traçado da estrutura da máquina resulta que o formato mais conveniente da bobina é o escalonado, com as dimensões indicadas na Fig. 143.

O comprimento médio da parte inferior da bobina resulta:

$$2 \cdot 23 + 2 \cdot 15{,}5 + \pi \cdot 5 = 92{,}7 \text{ cm}$$

O comprimento médio da parte superior é

$$2 \cdot 23 + 2 \cdot 15{,}5 + \pi \cdot 7 = 98{,}98 \text{ cm}$$

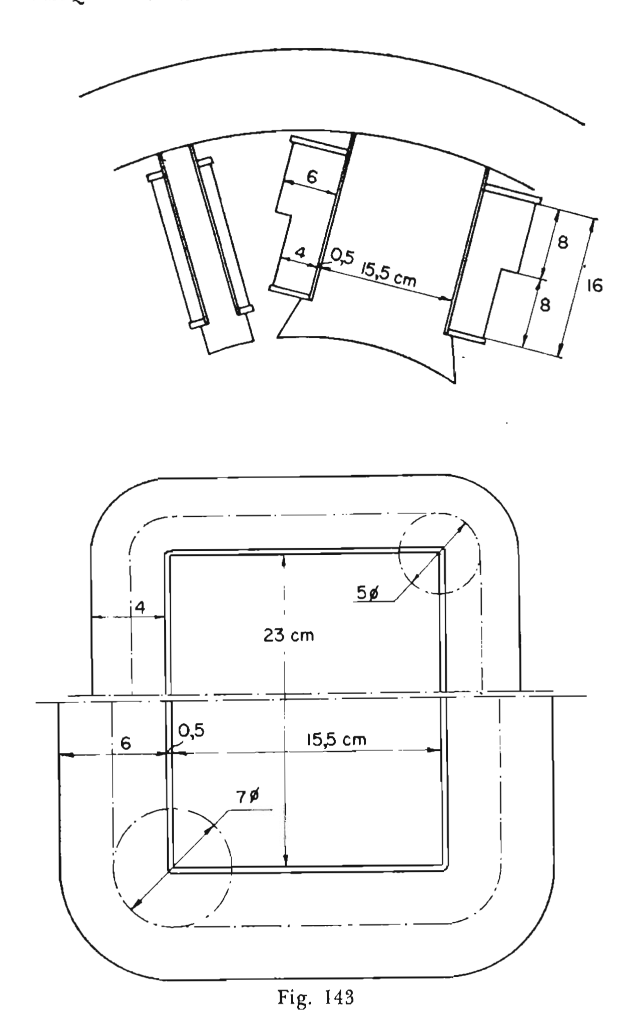


Fig. 143

O comprimento médio da bobina resulta:

$$l_m = \frac{92,7 + 98,98}{2} = 95,84 \text{ cm} = 0,9584 \text{ m}$$

Sendo os pólos ligados todos em série, com a máquina em regime de sobrecarga, a tensão existente em cada pólo, conforme parágrafo 68, resulta:

$$v_p = \frac{V}{2p} = \frac{125}{6} = 20,85 \text{ volts.}$$

A seção do fio a ser usado é obtida pela fórmula seguinte:

$$S = \frac{\rho \cdot l_m \cdot NI_{125}}{V} = \frac{0{,}0216 \cdot 0{,}9584 \cdot 8610}{20{,}85} = 8{,}54\ mm^2$$

Não existindo condutor que possua a seção calculada, escolhe-se o condutor que possua a seção imediatamente superior. Tal condutor é o n.º 7 (AWG), cuja seção é de 10,55 mm². Usa-se então o mencionado condutor com isolamento de algodão. O diâmetro do fio nu é 3,66 mm e quando isolado é de aproximadamente 4 mm. Na parte superior da bobina, (comprimento de 8 cm), o número das espiras em cada camada é 80/4 = 20. Tendo a bobina 6 cm de altura é possível executar-se 69/ /4 = 15 camadas. Consideram-se, entretanto, de 16 o número de camadas realizáveis, pois os condutores ao serem enrolados encaixam-se parcialmente nos da camada inferior. O número de camadas na parte inferior da bobina resulta: 40/4 = 10.

– Número de espiras na parte superior da bobina $20 \cdot 16 = 320$

– Número de espiras na parte inferior da bobina $20 \cdot 10 = 200$

Número total de espiras $= 520$

O comprimento do fio enrolado em cada bobina resulta:

$$l = l_m \cdot N = 0{,}9584 \cdot 520 = 498{,}4\ m$$

A resistência total do circuito de excitação é:

$$R_p = \frac{0{,}0216 \cdot l \cdot 2p}{S} = \frac{0{,}0216 \cdot 498{,}4 \cdot 6}{10{,}55} = 6{,}12\ \text{ohms}$$

Quando a carga da máquina for normal, a geração da f.e.m. de 131 volts requer que cada pólo possua as seguintes ampère-espiras:

– Obtidas através da característica de magnetização . . . 7000 Ae/pólo
– Para compensar a reação do induzido $30{,}35 \cdot 305 \cdot 0{,}1/2$ 462 Ae/pólo

Total 7462 Ae/pólo

A corrente de excitação resulta

$$I_c = \frac{7462}{520} = 14{,}3\ \text{ampères}$$

A densidade de corrente no condutor é:

$$\delta = \frac{I_e}{S} = \frac{14,3}{10,56} = 1,35 \text{ amp/mm}^2$$

Com carga normal a perda por efeito joule em cada bobina é:

$$W_p = \frac{R_p \cdot I_e^2}{6} = \frac{6,12 \cdot 14,3^2}{6} = 208 \text{ watts.}$$

Considerando-se, para efeito de irradiação térmica, somente a superfície lateral da bobina, a mesma resulta:

– Superfície periférica inferior $= (2 \cdot 23 + 2 \cdot 15,5 + \pi \cdot 9)\ 8 = 842 \text{ cm}^2$
– Superfície periférica superior $= (2 \cdot 23 + 2 \cdot 15,5 + \pi \cdot 13)\ 8 = 942 \text{ cm}^2$

Total $= 1784 \text{ cm}^2$

A irradiação por unidade de superfície resulta

$$W/m^2 = \frac{208}{0,1784} = 1165$$

Sendo a máquina aberta e a bobina executada com fio isolado por meio de algodão, considera-se $K = 30 \cdot 0,8 = 24$, resultando a elevação de temperatura:

$$\Delta T = \frac{W/m^2}{K} = \frac{1165}{24} = 48,5^\circ C$$

A elevação máxima admissível nas bobinas indutoras de excitação em derivação é de 65°C.

O peso do condutor de cobre empregado nas bobinas de excitação em derivação é:

$$P_{cu} = l \cdot S \cdot 8,9 = 49\,840 \cdot 6 \cdot 0,1055 \cdot 8,9 = 281 \text{ kg aprox.}$$

A título de controle calcula-se a corrente de excitação necessária à máquina quando no regime de sobrecarga, isto é,

$$L_{e125} = \frac{8610}{520} = 16,56 \text{ ampères}$$

para compará-la com a corrente máxima obtida excluindo-se totalmente o reostato de excitação, ou seja,

$$I_{CM} = \frac{V}{R_p} = \frac{125}{6,12} = 20,4 \text{ ampères}$$

Sendo I_{CM} maior que I_{c125}, o enrolamento de excitação possui desejada margem de segurança.

N) *Cálculo do reostato de excitação* — O reostato de excitação deve estar totalmente inserido quando a máquina funciona a vazio. Na característica de magnetização observa-se que para gerar-se, a vazio, a f.e.m. de 125 volts, são necessárias 5900 ampère-espiras por pólo, isto é, a corrente de excitação deve ter valor igual a:

$$I_{ex} = \frac{5900}{520} = 11,35 \text{ ampères}$$

Sendo a tensão de excitação de 125 volts, a resistência total do circuito de excitação, com o reostato inserido, resulta:

$$R_t = \frac{125}{11,35} = 11 \text{ ohms}$$

Sendo a resistência do enrolamento de excitação (quando aquecido) de 6,12 ohms, a resistência do reostato resulta:

$$R_R = 11 - 6,12 = 4,88 \text{ ohms}$$

O) *Rendimento* — Para o cálculo do rendimento da máquina, além das perdas consideradas até agora, é preciso tomar em consideração as perdas mecânicas de atrito e ventilação e as que se verificam no reostato de excitação.

As perdas por atrito e ventilação, sendo $v = 15,16$ m/seg, conforme parágrafo 46, resultam:

$$0,003 \cdot 100\,000 = 300 \text{ watts}$$

As perdas no circuito de excitação são calculadas com base na tensão $V = 125$ volts e na corrente de excitação existente no circuito quando a máquina funciona em regime normal, ou seja, quando $I_c = 14,3$ ampères (item M). Assim sendo, a perda por excitação resulta:

$$W_{ex} = 125 \cdot 14,3 = 1888 \text{ watts}$$

As perdas globais da máquina resultam:

1 — Induzido, ferro e cobre (item K)	3893 watts
2 — Comutador, atrito e queda de tensão (item D)	1830 watts
3 — Pólos auxiliares (item L)	1165 watts
4 — Excitação em derivação, inclusive reostato	1888 watts
5 — Perdas adicionais (1%)	1000 watts
6 — Perdas superficiais (parágrafo 35) 403/3	135 watts
7 — Perdas por atrito com o ar e nas buchas	300 watts
Total	10 211 watts

$$\text{Rendimento} = \frac{W}{W + W_p} = \frac{100\,000}{100\,000 + 10\,211} = 0{,}90$$

No início do cálculo do gerador, o rendimento do mesmo, obtido através da tabela da Fig. 121, foi considerado a 0,89.

P) *Capacidade do ventilador* — Para o cálculo da capacidade do ventilador, computam-se todas as perdas, com exceção das que são devidas ao atrito com o ar e as que se processam no reostato de excitação, por estar este colocado na parte externa da máquina. As perdas a serem consideradas são:

1 — No induzido	3893 watts
2 — No comutador	1830 watts
3 — Nos pólos auxiliares	1165 watts
4 — Na excitação em derivação 208 × 6	1248 watts
5 — Perdas adicionais	1000 watts
6 — Perdas superficiais	135 watts
Total	9271 watts

Fixando-se em 40°C a elevação de temperatura do ar, a capacidade do ventilador deve ser:

$$Q = \frac{0{,}1 \cdot W_t}{T} = \frac{0{,}1 \cdot 9271}{40} = 23{,}1 \text{ m}^3 \text{ por minuto.}$$

Q) *Cálculo do diâmetro do eixo* — O diâmetro do eixo, nos pontos terminais, é

$$d = K \sqrt[4]{\frac{W}{n}}$$

onde:

W = potência nominal da máquina em watts.

n = número de rotações por minuto da máquina.

K = fator que varia entre 2,6 para máquinas pequenas e 2,8 para máquinas grandes.

Escolhendo-se K = 2,7, obtém-se:

$$d = 2{,}7 \sqrt[4]{\frac{100\,000}{500}} = 2{,}7 \sqrt[4]{200} = 10{,}15 \text{ cm}$$

A distância entre os centros dos mancais de apoio, conforme Fig. 127, é aproximadamente 115 cm, portanto o diâmetro máximo do eixo deverá ser:

$$d_M = 0{,}08 \cdot L = 0{,}08 \cdot 115 = 9{,}2 \text{ cm}$$

O mesmo foi executado com 13,5 cm, o que assegura amplo limite de segurança.

CAPÍTULO VIII

84 — Princípio de funcionamento dos motores de corrente contínua

Conforme o princípio da reversibilidade das ações eletromagnéticas, um dispositivo capaz de transformar energia mecânica em energia elétrica pode efetuar também a transformação inversa, isto é, a da energia elétrica em mecânica. Isto leva a pensar que um dínamo pode funcionar como motor, quando alimentado por uma fonte de corrente contínua.

Examine-se, por exemplo, o circuito indicado na Fig. 144, no qual é lançada uma corrente, através das escovas, no sentido indicado na figura.

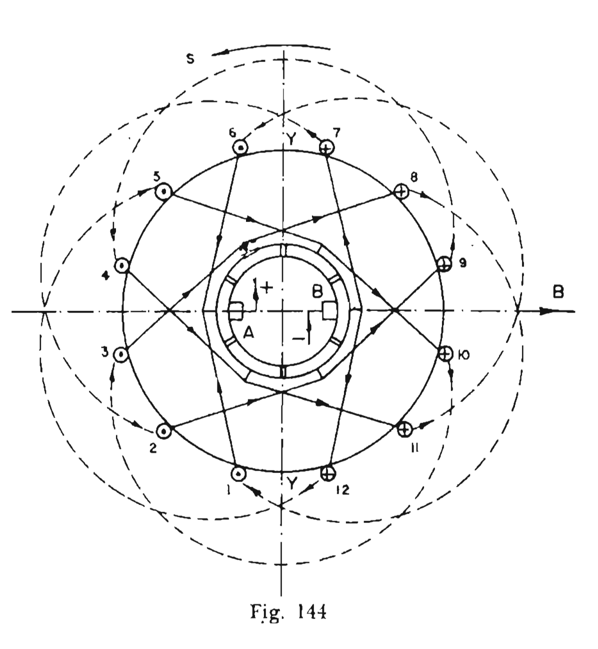


Fig. 144

Seguindo a corrente através dos condutores, vê-se que esta última distribui-se de forma que, em todos os condutores à esquerda do plano YY, ela é dirigida da folha para o observador. Nos condutores à direita do plano YY, a corrente é dirigida do observador para a folha.

Se este enrolamento estiver imerso num campo magnético uniforme, dirigido no sentido B, conforme Fig. 145, cada condutor será solicitado por uma força perpendicular ao campo e à direção da corrente, cujo valor corresponde a:

$$F = B \cdot l \cdot I$$

onde F é expressa em dinas, l em centímetros e I em [UEM].

A direção desta força pode ser determinada com a regra da palma da mão direita ou com a dos três dedos da mão direita. Esta força é

dirigida no sentido que obriga o induzido da Fig. 144 a rodar acompanhando a seta S.

Se a corrente for expressa em ampères, a força que solicita cada condutor é obtida em grama-força pela seguinte expressão:

$$f_{gf} = \frac{1}{10} \frac{B \cdot l \cdot I_A}{981} \text{ ou em kg por:}$$

$$f_{kg} = \frac{B \cdot l \cdot I_A}{981 \cdot 10^4}$$

Do momento em que cada condutor do dispositivo indicado na Fig. 145 esteja rigidamente ligado ao induzido, não poderá deslocar-se na direção da força f, mas será obrigado a deslocar-se tangencialmente ao induzido. Assim sendo, a força f_1 que solicita o condutor A tangencialmente ao induzido é expressa por:

$$f_1 = f \cdot \text{sen } \alpha$$

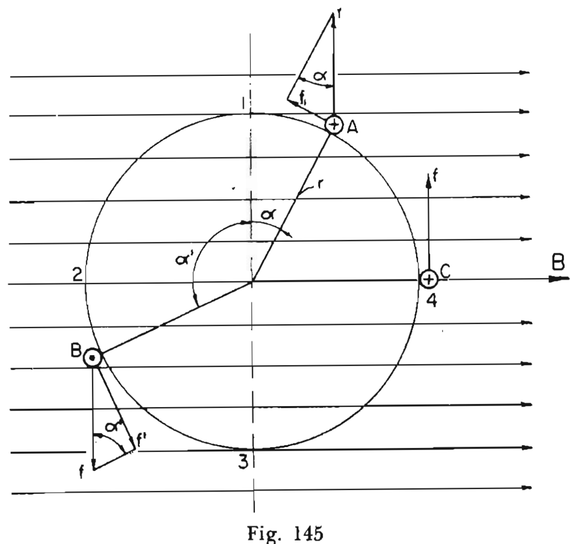


Fig. 145

A que solicita o condutor B é $f'_1 = f \cdot \text{sen } \alpha$, e por fim a que solicita o condutor C é a própria força f, pois neste caso sendo $\alpha = 90°$, sen $\alpha = 1$.

Do exposto, compreende-se que o valor da força tangencial depende da posição do condutor com respeito ao campo magnético indutor, sendo nula nas posições 1 e 3 ($\alpha = 0$ e $\alpha = 180$), isto é, em correspondência com o plano de inversão, e máxima nas posições 2 e 4 ($\alpha = 90$ e $\alpha = 270$). O produto de cada força tangencial pelo braço r fornece o conjugado elementar com que cada condutor contribui para a formação do conjugado total que solicita o induzido a girar. Este conjugado total é obtido pela soma dos conjugados elementares antes mencionados.

Examinando-se a Fig. 144, vê-se que em virtude da direção das correntes e do campo, o induzido é solicitado a girar no sentido da seta S. Se o mesmo induzido pertencesse a um dínamo, destinado a gerar corrente no mesmo sentido, como ocorre no esquema da Fig. 11, o mesmo

deveria girar em sentido contrário ao indicado pela seta S (Fig. 144). Isto quer dizer que, mantendo-se constante o campo e lançando-se no induzido de um dínamo corrente com igual sentido da que é gerada pelo mesmo, o induzido girará espontaneamente, como motor, no sentido contrário ao do possuído pela máquina quando em funcionamento como gerador.

Como é sabido, sobre o induzido de um dínamo (gerador) funcionando com carga, age um conjugado resistente, que atua em sentido contrário ao movimento. Este conjugado, que depende da corrente da máquina, continua existindo quando, desligado o motor de acionamento, lança-se no induzido a mesma corrente que o gerador antes possuía. Nestas condições, o referido conjugado atua como conjugado motor e a máquina passa a transformar energia elétrica em energia mecânica.

Pelo exposto, vê-se que a máquina dínamo-elétrica permite a transformação da energia mecânica em energia elétrica (gerador) e da energia elétrica em energia mecânica (motor). Por isso se diz que esta máquina é reversível.

Do ponto de vista da construção nenhuma diferença existe entre dínamo e motor de corrente contínua.

O borne negativo de um motor é o de entrada da corrente e por isso deve ser ligado ao borne negativo do gerador de alimentação.

Com igual potência e tensão o motor absorve mais corrente do que o dínamo fornece. De fato, um dínamo para fornecer a potência elétrica W_f, absorve a potência mecânica $W_m = \frac{W_f}{\mu}$, onde μ é o rendimento da máquina. A corrente fornecida pelo dínamo é $I_d = \frac{W_f}{V}$ O motor que fornece a potência mecânica W_f absorve a potência elétrica $W_e = \frac{W_f}{\mu}$. A corrente que o mesmo absorve é $I_m = \frac{W_f}{\mu \cdot V}$ sendo maior que I_d relativa ao dínamo.

Lembrando que as ações eletromagnéticas invertem-se ao se inverter o sentido da corrente ou do campo indutor, desejando-se inverter a rotação de um motor de corrente contínua é preciso inverter o sentido do campo ou o da corrente. O movimento não se inverte quando se muda simultaneamente o sentido do campo e o da corrente.

Pelo exposto, conclui-se que, desejando-se fazer girar o induzido do motor no mesmo sentido em que girava no funcionamento como dínamo, é preciso que no motor o sentido do campo ou o da corrente resulte invertido com respeito ao do dínamo.

85 — Reação do induzido

No parágrafo anterior supôs-se manter inalterado o campo de um dínamo e lançar, no induzido do mesmo, por meio de uma fonte externa, uma corrente com o mesmo sentido da gerada pelo dínamo. A conclusão a que se chegou é que a máquina passa a funcionar como motor, girando em sentido contrário ao que a mesma tinha no funcionamento como dínamo.

Os condutores induzidos do motor, percorridos pela mesma corrente que os percorria no funcionamento como dínamo, criarão um campo induzido de reação idêntico ao precedente. O campo induzido produz uma distorção do campo indutor. Esta distorção, que no dínamo verifica-se no sentido da rotação, no motor processa-se em sentido contrário, pois, na suposição feita, o sentido de rotação do motor é contrário ao do dínamo.

O plano de comutação, que no caso do dínamo desloca-se no sentido do movimento, no caso do motor deslocar-se-á em sentido contrário.

No que diz respeito aos efeitos energéticos, a reação do induzido atua no dínamo como ação freiante enquanto que no motor atua como ação motora. Esta é a razão pela qual o motor gira em sentido contrário ao do dínamo, quando o sentido do campo e o da corrente induzida ficarem inalterados.

Uma vez processado o deslocamento do plano de inversão, por efeito da reação do induzido, desejando-se aproveitar o máximo efeito eletromagnético dos condutores rotóricos, é preciso deslocar as escovas em sentido contrário ao movimento. Este deslocamento das escovas provoca um enfraquecimento do fluxo, pois as espiras compreendidas no duplo ângulo do deslocamento das escovas terão efeito desmagnetizante. O enfraquecimento do fluxo acentua-se ao crescer o ângulo de deslocamento das escovas e a corrente nos condutores induzidos.

Para neutralizar os efeitos da reação do induzido nos motores, usam-se os mesmos artifícios que foram examinados nos dínamos, somente que nos motores as escovas devem ser deslocadas em sentido contrário ao da rotação e cada pólo auxiliar deve possuir a mesma polaridade do pólo principal que o precede na rotação.

86 — Comutação

Nos motores verificam-se os mesmos fenômenos de comutação que se processam nos dínamos. A geração da f.e.m. de auto-indução, nas espiras curto-circuitadas pelas escovas, verifica-se da mesma forma que a explicada no parágrafo 51. Para neutralizar os efeitos da comutação, é necessário, como pelos dínamos, recorrer ao deslocamento das escovas ou aos pólos auxiliares.

Nos motores, tanto o sentido do deslocamento das escovas como a polaridade dos pólos auxiliares coincidem com o correspondente artifício necessário a compensar a reação do induzido dos dínamos, conforme foi visto no parágrafo anterior.

Os motores que usam pólos auxiliares funcionam com as escovas colocadas em correspondência com o plano de inversão.

Os cálculos do valor da f.e.m. de reatância e das dimensões dos pólos auxiliares dos motores são idênticos ao que foi exposto para os dínamos.

87 — Força contra-eletromotriz do motor

Nos parágrafos anteriores foi visto que, lançando-se corrente no induzido de um dispositivo dínamo-elétrico, este funciona como motor. O conjunto dos condutores rotóricos, deslocando-se no interior de um campo magnético, fica sujeito aos fenômenos de indução eletromagnética, isto é, em cada um deles gera-se uma f.e.m. O sentido desta f.e.m., pela lei de LENZ, é tal que se opõe às causas que a produzem, isto é, a corrente e o movimento. Esta f.e.m. será, portanto, dirigida em sentido contrário ao da corrente no induzido, atuando como força contra-eletromotriz (f.c.e.m.).

O valor desta f.c.e.m. depende, conforme foi visto no parágrafo 42, do valor do fluxo, do número das rotações da máquina, do número dos condutores do induzido e do tipo de enrolamento, isto é,

$$E_c = 10^{-8} \cdot \frac{n}{60} \cdot \frac{p}{a} \cdot N \cdot \phi$$

onde

E_c = f.c.e.m. expressa em volts.
n = r.p.m do rotor.
p = número de pares de pólos.
a = número de pares de vias internas do induzido.
N = número total dos condutores induzidos.
ϕ = fluxo de cada pólo em maxwell.

Indicando-se com I a corrente absorvida pelo motor e com R_i a resistência interna do mesmo, isto é, a resistência interna do induzido, do contato escovas-comutador e eventualmente do circuito dos pólos auxiliares, a queda ôhmica de tensão que se verifica no motor é expressa por $R_i \cdot I$. Para as máquinas de construção normal, esta queda de tensão tem aproximadamente 5% do valor da tensão de alimentação.

Para que o motor possa absorver a corrente I, necessária ao seu funcionamento, deve ser alimentado pela tensão expressa por:

$$V = E_c + R_i I$$

No motor, a queda de tensão $R_i I$ faz com que a f.c.e.m. E_c seja menor que a tensão aplicada nos bornes do mesmo. Nos dínamos verifica-se o contrário, pois a f.e.m. é maior que a tensão existente em seus bornes.

88 – Número de rotações do motor

Da relação $V = E_c + R_i I$ resulta que para cargas constantes ou seja para I = constante, o valor da f.c.e.m. E_c é constante e resulta: $E_c = V - R_i I$. Sendo o valor $R_i I$ muito pequeno em comparação ao valor V, pode-se escrever que $V = \sim E_c$ e concluir que o funcionamento do motor é caracterizado pela geração, no enrolamento induzido, de uma f.c.e.m. cujo valor é igual a V, dirigida em oposição a esta última. Com esta conclusão é possível escrever:

$$V = \sim E_c = 10^{-8} \frac{n}{60} \cdot \frac{p}{a} N \phi$$

Agrupando-se todos os valores constantes num único fator, obtém-se:

$$V = K n \phi$$

Esta expressão mostra a dependência direta entre os valores de V, n e ϕ. Se V for constante, aumentando o fluxo magnético, o número das rotações da máquina diminuirá na mesma proporção. Diminuindo pelo contrário o fluxo magnético, o número das rotações da máquina aumentará na mesma proporção.

Fisicamente explica-se este fenômeno pela necessidade da tensão V ser sempre contrabalançada pela f.c.e.m. E_c. Aumentando-se o fluxo magnético, a máquina produz a f.c.e.m. com um número menor de rotações por minuto. Diminuindo-se o fluxo magnético da máquina, o valor da f.c.e.m. E_c será alcançado com um número maior de r.p.m do induzido.

Pelo exposto, se o valor da tensão de alimentação de um motor for constante, será possível variar a velocidade do mesmo variando o valor de seu fluxo magnético e, precisamente, aumenta-se a velocidade diminuindo-se o fluxo e vice-versa.

O número das rotações por minuto da máquina é expresso por:

$$n = 10^8 \cdot 60 \cdot \frac{a}{p} \frac{E_c}{N \phi} \text{ ou}$$

$$n = 10^8 \cdot 60 \, \frac{a}{p} \, \frac{V - R_i I}{N \phi} = \frac{V - R_i I}{K \phi}$$

89 — Potência de um motor de corrente contínua

Nos parágrafos anteriores foi visto que a dependência entre o valor V da tensão aplicada e o E_c da f.c.e.m. pode ser representada pela seguinte equação:

$$V = E_c + R_i I$$

Multiplicando-se ambos os membros desta equação pelo valor I obtém-se:

$$VI = E_c I + R_i I^2$$

O primeiro membro VI representa a potência que o motor absorve da linha. O segundo membro representa como se desdobra a potência elétrica absorvida. O fator $R_i I^2$ representa a potência elétrica perdida na resistência interna da máquina (induzido, contato escovas-comutador, excitação em série e pólos auxiliares). O fator $E_c I$ deve, por conseguinte, representar a potência elétrica que se transforma em outro tipo de energia, ou seja, potência mecânica e perdas.

A potência elétrica, que se transforma em outro tipo de energia, pode ser expressa por:

$$P_{Et} = E_c \, I = 10^{-8} \cdot \frac{n}{60} \cdot \frac{p}{a} \cdot N \, \phi \, I$$

Deduzindo-se desta potência as perdas mecânicas, as perdas superficiais e adicionais, obter-se-á a potência mecânica em watts que o motor fornece no seu eixo. Dividindo-se esta potência por 736 obter-se-á a potência do motor em (cv).

90 — Conjugado motor

A relação existente entre a potência em kgm/seg do motor e o respectivo conjugado em kgm é expressa pela seguinte equação:

$$P_{kgm/seg} = \frac{2 \pi n}{60} \cdot C_{kgm}$$

de onde o valor do conjugado resulta:

$$C_{kgm} = \frac{60}{2 \pi n} \cdot P_{kgm/seg}$$

Lembrando-se de que 1 kgm = 9,81 joule e desejando expressar a potência em watts, a fórmula acima escrita transforma-se em:

$$C_{kgm} = \frac{60}{2 \pi 9{,}81} \cdot \frac{W}{n} = 0{,}975 \frac{W}{n}$$

Esta expressão evidencia a relação existente entre o conjugado motor e o fator $\frac{W}{n}$.

Substituindo-se a potência pela sua expressão obtida no item precedente, o conjugado motor resulta expresso por:

$$C_{kgm} = \frac{60}{2 \pi 9{,}81} \frac{1}{n} 10^{-8} \frac{n}{60} \frac{p}{a} N \phi I =$$

$$= \frac{10^{-8}}{2 \pi 9{,}81} \frac{p}{a} N \phi I$$

Agrupando-se as grandezas constantes num único fator, a equação antes escrita transforma-se em:

$$C = K \phi I$$

Esta fórmula mostra que o conjugado da máquina é proporcional ao fluxo magnético e à corrente da mesma. Esta proporcionalidade, entretanto, existe somente na aparência, pois, por efeito dos fenômenos de reação do induzido, mantendo constante a corrente de excitação, o conjugado não aumenta proporcionalmente com o aumento da corrente. Na realidade, o aumento de corrente provoca aumento da reação do induzido e esta enfraquece o fluxo magnético, alterando a proporcionalidade que a fórmula antes escrita pretende mostrar.

91 — Perdas de potência e rendimento dos motores de corrente contínua

As perdas de potência que se verificam nos motores são classificadas, em geral, de perdas constantes e de perdas variáveis, conforme a sua natureza.

As perdas constantes não mudam ao variar da carga do motor. São elas as que se verificam no ferro, as de efeito joule no circuito de excitação em derivação e as que se verificam por efeito do atrito.

As perdas variáveis acompanham a variação da carga da máquina. São elas as que se verificam por efeito joule no enrolamento do induzido, nos pólos de excitação em série e nos pólos auxiliares.

Nos motores destinados a funcionar muitas horas seguidas com carga reduzida e nos motores fechados, com pouca ventilação, é conveniente que as perdas constantes sejam reduzidas a valores mínimos.

O rendimento do motor é dado pela relação entre a potência fornecida e a absorvida. A potência fornecida é obtida subtraindo-se as perdas da potência absorvida, isto é:

$$W_f = W_a - (W_c + W_v)$$

onde W_f representa a potência fornecida; W_a a potência absorvida; W_c e W_v respectivamente as perdas constantes e as variáveis.

O rendimento do motor resulta:

$$\mu = \frac{W_a - (W_c + W_v)}{W_a}$$

O cálculo das perdas é executado pelos mesmos processos indicados para os dínamos.

O rendimento de um motor varia com o variar da carga, pois com esta variam as perdas variáveis do mesmo. Demonstra-se que o rendimento é máximo quando as perdas constantes forem iguais às variáveis. Tal demonstração executa-se da seguinte forma:

Indicando com $W_a = VI$ e $W_v = R_iI^2$ e substituindo-os na fórmula do rendimento, obtém-se:

$$\mu = \frac{VI - (W_c + R_iI^2)}{VI} = \frac{V - (W_c/I + R_iI)}{V}$$

Sendo o denominador (V) constante, o máximo rendimento verificar-se-á quando o numerador da fração adquirir o seu máximo valor. Derivando o numerador com respeito à corrente I, obtém-se:

$$\frac{d\ (V - W_c/I - R_iI)}{dI} = \frac{dV}{dI} - \frac{d\ \dfrac{W_c}{I}}{dI} - \frac{d\ R_iI}{dI}$$

$$\text{O termo } \frac{dV}{dI} = O, \text{ pois } V = \text{constante}$$

$$\text{O termo} - \frac{d\dfrac{W_c}{I}}{dI} = - \frac{I\dfrac{dW_c}{dI} - W_c\dfrac{dI}{dI}}{I^2} = - \frac{O - W_c}{I^2} = \frac{W_c}{I^2}$$

$$\text{O termo } \frac{dR_iI}{dI} = R_i\frac{dI}{dI} + I\frac{dR_i}{dI} = R_i + O = R_i$$

Resulta que:

$$\frac{d\ (V - W_c/I - R_iI)}{dI} = \frac{W_c}{I^2} - R_i$$

Igualando-se a derivada a zero, resulta:

$$\frac{W_c}{I^2} - R_i = O, \text{ de onde } \frac{W_c}{I^2} = R_i \text{ e por fim } W_c = R_iI^2$$

Representando o fator RI^2 as perdas variáveis, o máximo rendimento ocorre quando, no motor, as perdas constantes são iguais às variáveis. O projeto dos motores deve ser feito de forma que estes apresentem o máximo rendimento em correspondência com a carga normal.

92 — Funcionamento do motor de corrente contínua

O estudo do comportamento dos motores de corrente contínua, conforme seu sistema de excitação, deve ser feito tomando-se por base as fórmulas até agora obtidas, isto é:

$$E_c = K\, n\, \phi;\ V = E_c + R_iI;\ C = K\, \phi\, I;\ n = \frac{V - R_iI}{K\, \phi} = \frac{E_c}{K\, \phi}$$

O comportamento dos motores, como o dos dínamos, pode ser representado por meio de curvas que reproduzem graficamente as relações entre as diferentes grandezas elétricas e mecânicas que caracterizam a máquina. Tais curvas são chamadas de características.

A característica mais importante de um motor é a que representa como varia o conjugado com o variar do número das rotações por minuto de seu eixo. Esta curva é chamada de característica mecânica.

Outras curvas características importantes são: a que mostra a relação entre o conjugado motor e a corrente absorvida; a que mostra a relação entre as r.p.m e a corrente absorvida e por fim a que mostra a relação entre a corrente absorvida e o rendimento da máquina.

A fim de comparar o comportamento dos vários tipos de motores, convém estudar o funcionamento dos mesmos nas seguintes fases:

a) no arranco.
b) no funcionamento a vazio.
c) no funcionamento com carga.

93 — Motor com excitação independente

No motor com excitação independente, conforme Fig. 146, o induzido é alimentado por uma linha de tensão constante V, enquanto o circuito de excitação é alimentado por uma bateria de acumuladores ou outra fonte de corrente contínua qualquer.

a) *Arranco* — No momento do arranco o motor está parado e por isso em seu enrolamento induzido ainda não se gerou a f.c.e.m. E_c. O único obstáculo que se opõe à corrente é a resistência interna R_i do induzido. O valor da corrente, no arranco, é dado por:

$$I = \frac{V}{R_i}$$

Tendo R_i valor muito pequeno, o da corrente de arranco resulta muito elevado.

A fim de impedir que a corrente de arranco adquira valores excessivamente elevados e portanto perigosos, insere-se no motor um reostato R_a, chamado de reostato de arranco ou de partida, o qual no momento de se ligar o motor com a linha deve estar totalmente inserido. Quando o motor inicia a rotação, gera-se em seus condutores induzidos a f.c.e.m. que aumenta com o aumentar da velocidade do rotor. Assim sendo, o reostato pode ser gradativamente desinserido.

A resistência do reostato de partida deve ter valor tal que impeça à corrente do arranco superar o dobro do valor da corrente normal do motor.

No momento do arranco, se o valor do fluxo for pequeno, o do conjugado motor $C = K \phi I$ resulta pequeno também. Se este conjugado não conseguir vencer o conjugado resistente, o motor fica

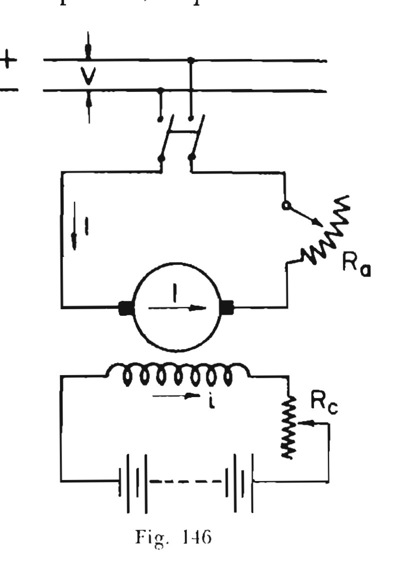


Fig. 146

parado e, não se gerando no seu induzido a f.c.e.m., a corrente alcançará valores excessivos, prejudiciais ao motor, que poderá até queimar.

A fim de se evitar o inconveniente acima citado, recomenda-se que o fluxo magnético, na hora do arranco, possua o valor máximo possível, o que é obtido excluindo-se totalmente o reostato de excitação.

Pelos fatos expostos conclui-se que o motor de excitação independente não é apropriado para serviços que exijam a partida do mesmo com carga máxima.

b) *Funcionamento a vazio* — Quando o motor funciona a vazio é nulo o conjugado útil aplicado ao eixo do motor; nestas condições o único conjugado que o motor deve vencer é constituído pela resistência de atrito e pelo efeito freiante devido às perdas no ferro. Este conjugado alcança no máximo 5% do valor do conjugado útil da máquina.

Se o conjugado útil é pequeno, também o valor da corrente o será, pois

$$I = \frac{C}{K \phi}$$

A corrente pequena provocará quedas de tensão de valor pequeno e o valor da f.c.e.m. aproxima-se do valor da tensão V, isto é, $E_c = V$. A velocidade da máquina será máxima, sendo seu valor definido por:

$$n = \frac{V - R_i I}{K \phi}$$

O valor máximo da velocidade da máquina obtém-se quando a mesma trabalha a vazio com o reostato de excitação totalmente inserido, pois nestas condições o valor do fluxo magnético é mínimo.

c) *Funcionamento com carga* — Quando o motor funciona com carga, absorve uma corrente proporcional ao conjugado resistente, isto é:

$$I = \frac{C}{K \phi}$$

É compreensível que, aumentando-se o conjugado, aumenta-se a corrente absorvida pelo motor. O aumento da corrente provoca um aumento das quedas de tensão e por conseguinte uma diminuição da f.c.e.m. e do número de rotações da máquina, conforme evidencia a fórmula:

$$n = \frac{V - R_i I}{K \phi}$$

O fator $R_i I$, mesmo quando a máquina funciona a plena carga, é uma pequena fração da tensão de alimentação. Portanto, a diminuição máxima da velocidade é relativamente pequena. Além dos fatos expos-

tos, há outro fator que contribui para manter a velocidade praticamente constante com o variar da carga do motor, conforme se verá a seguir. Aumentando a carga aumenta o valor da corrente I, o que provoca uma diminuição do numerador da fração acima escrita. Isto porque o aumento da corrente provoca aumento da reação do induzido e por conseguinte do efeito desmagnetizante. A diminuição do fluxo magnético, causada pelo acréscimo da reação do induzido, faz diminuir o denominador da fração acima escrita, compensando em parte a diminuição do numerador. Nestas condições o valor da velocidade n mantém-se sensivelmente constante.

Pelo exposto compreende-se que grandes variações do conjugado C são acompanhadas por pequenas variações da velocidade da máquina, conforme indica a sua característica mecânica, representada na Fig. 147. O motor de corrente contínua, com excitação independente, é caracterizado pelo fato de apresentar uma velocidade praticamente constante ao variar a carga.

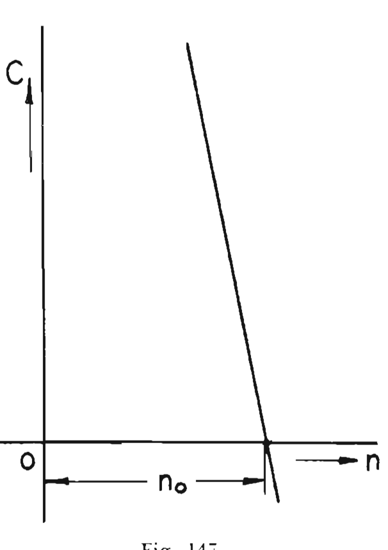


Fig. 147

A regulação da velocidade do motor, conforme mostra a fórmula antes escrita, é feita através da variação do fluxo magnético e, precisamente, aumentando-se o fluxo diminui-se a velocidade e vice-versa. A variação do fluxo, por sua vez, é feita por meio do reostato de excitação.

A máxima velocidade do motor verifica-se quando o mesmo funciona a vazio com o reostato de excitação totalmente inserido. No funcionamento a vazio o fator $R_i I$ é muito pequeno, resultando $E_c = \sim V$ e portanto

$$n_o = \sim \frac{V}{K\,\phi}$$

Inserindo-se totalmente o reostato de excitação, o fluxo resulta mínimo e por conseguinte o número de rotações é máximo.

$$n_{Max} = \sim \frac{V}{K\,\phi_{min}}$$

Desta expressão resulta evidente que diminuindo-se o fluxo abaixo de determinado valor, provoca-se um aumento exagerado do número de rotações. Este aumento exagerado das rotações constitui sério perigo, pois a velocidade centrífuga excessiva pode provocar a ruptura das amarrações dos enrolamentos e a saída destes das respectivas ranhuras.

d) *Fuga do motor* — Foi visto que a diminuição do fluxo magnético de um motor provoca a diminuição da f.c.e.m., o aumento da corrente absorvida e o aumento da velocidade do mesmo.

O aumento da corrente absorvida aumenta o efeito de reação do induzido, o que enfraquece ulteriormente o fluxo magnético da máquina.

Ao se diminuir excessivamente o fluxo, pode ocorrer que, por efeito da reação do induzido, o fluxo resultante fique muito pequeno, o que provoca uma absorção exagerada de corrente, adquirindo o rotor velocidade muito elevada e portanto perigosa. Quando isso ocorre diz-se que o motor entrou em fuga ou disparou e as conseqüências para o motor são quase sempre destrutivas.

94 — Motor com excitação em derivação

O motor com excitação em derivação tem o mesmo comportamento do motor com excitação independente, pois conforme mostra a Fig. 148, tanto o induzido como o indutor são alimentados pela linha de alimentação com tensão constante V.

É preciso, entretanto, ter cuidado para que o circuito de excitação seja derivado com a linha nos pontos *A* e *B*, pois somente assim terá como tensão de alimentação a tensão da linha.

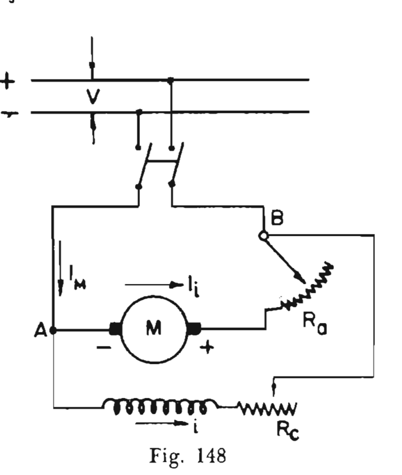


Fig. 148

Se o circuito de excitação for derivado entre as escovas do motor, a máquina terá seu funcionamento prejudicado, pois no momento do arranco, por exemplo, estando o reostato R_a totalmente inserido, a tensão disponível nos bornes do circuito de excitação será muito pequena. A ligação errada do circuito de excitação faz com que o motor possua fluxo reduzido, exatamente quando, pelo contrário, necessita de fluxo magnético com valor máximo.

A regulação da velocidade pode ser feita, como nos motores de excitação separada, por meio do reostato de campo. Em geral, a manobra de arranco e a de regulação da velocidade são feitas por meio de um único dispositivo de comando, do tipo indicado na Fig. 149.

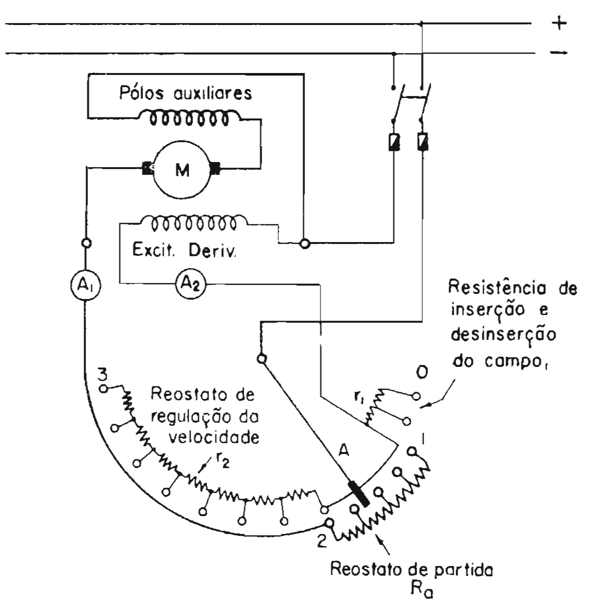


Fig. 149

No momento do arranco, o braço de comando A está na posição "O", na qual o induzido está desligado da linha de alimentação. O circuito de excitação está ligado à linha através da resistência r_1, a qual tem a finalidade de atenuar os fenômenos de auto-indução, no momento da abertura e do fechamento do circuito de excitação que possui elevada indutância magnética.

Com o braço de comando na posição "1", o circuito de excitação está diretamente ligado à linha de alimentação e por conseguinte o valor do fluxo magnético é máximo. O induzido resulta ligado com a linha através do reostato de arranco, que nesta posição está totalmente inserido.

Com o aumento da velocidade do motor, é possível desinserir gradativamente o reostato de arranco. Sua desinserção total verifica-se na posição "2". Desejando-se aumentar a velocidade do motor, desvia-se o braço do comando "A", de forma a inserir, gradativamente, o reostato de excitação, até a posição "3", que corresponde à de máxima velocidade.

95 — Motor de excitação em série

No motor de excitação em série, a corrente absorvida pelo induzido produz também o fluxo magnético indutor. A seguir será examinado o comportamento deste tipo de motor nas diferentes fases de funcionamento.

a) *Arranco* — No momento do arranco, a falta da f.c.e.m. obriga o uso de um reostato de arranco R_a, pelas mesmas razões expostas anteriormente, relativas aos motores de excitação independente e em derivação.

No momento do arranco, o valor da corrente I é elevado, e por conseguinte, elevado será também o do fluxo magnético. Assim sendo, o conjugado da máquina $C = K \phi I$ resulta proporcional ao quadrado da corrente, adquirindo valores elevados.

Pelo exposto, conclui-se que o motor com excitação em série é indicado nos casos em que o mesmo deve arrancar com carga.

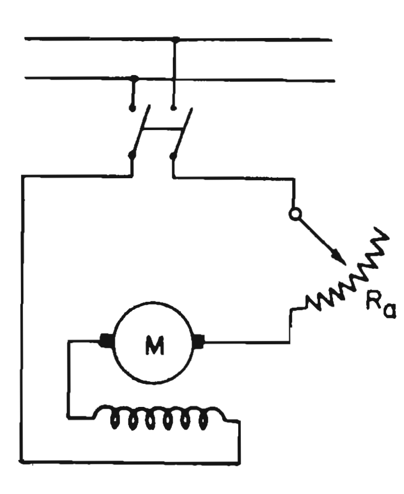


Fig. 150

b) *Funcionamento a vazio* — No funcionamento a vazio, o conjugado resistente é muito pequeno, e por conseguinte, pequena será também a corrente absorvida pelo motor, pois

$$I = \frac{C}{K \phi}$$

Se a corrente I for pequena, o será também o fluxo magnético, e o número das rotações expresso por

$$n = \frac{V - R_1 I}{K \phi}$$

tende a alcançar valores elevadíssimos, pois, com o diminuir da corrente, o numerador da fração aumenta, enquanto o denominador diminui. Este fato é facilmente compreensível quando se pensa que diminuindo-se o fluxo, a f.c.e.m. deve ser produzida à custa da elevação das rotações do induzido. Com o motor funcionando a vazio, a única oposição ao movimento do mesmo é constituída pelo conjugado devido às perdas e aos atritos. Este conjugado resistente, nos pequenos motores, que é considerável quando comparado à potência nominal do motor, consegue limitar a velocidade, impedindo que esta alcance valores destrutivos. Nos grandes motores, onde o conjugado resistente é comparativamente pequeno em relação à potência nominal da máquina, a velocidade alcança valores destrutivos.

Pelas razões expostas, conclui-se que o motor de excitação em série não deve ser usado em trabalhos em que exista a possibilidade da máquina vir a funcionar sem carga.

c) *Funcionamento com carga* — Quando o motor funciona com carga, absorve uma corrente proporcional ao conjugado resistente, expressa por:

$$I = \frac{C}{K\,\phi}$$

Aumentando-se o conjugado, aumenta-se a corrente. O aumento de corrente, entretanto, não é diretamente proporcional a "C", pois aumentando-se a corrente, aumenta-se o fluxo. Verificando-se, então, aumento simultâneo do numerador e do denominador da fração antes escrita, sucede que o aumento da corrente não acompanha proporcionalmente o do conjugado.

A curva representada na Fig. 151 mostra como varia o conjugado da máquina com a variação da corrente absorvida. No primeiro trecho "OA" a variação verifica-se com lei quadrática, pois não sendo o circuito magnético saturado resulta $\phi = K_1\,I$ e portanto o conjugado:

$$C = K\,I\,\phi = K\,I\,K_1\,I = K_t\,I^2$$

No segundo trecho "AB", a variação é linear, pois, tendo a máquina alcançado a saturação, o fluxo aumenta lentamente com a variação da corrente e, por conseguinte, o conjugado varia em direta proporcionalidade com a corrente, isto é, $C = K\,\phi\,I$.

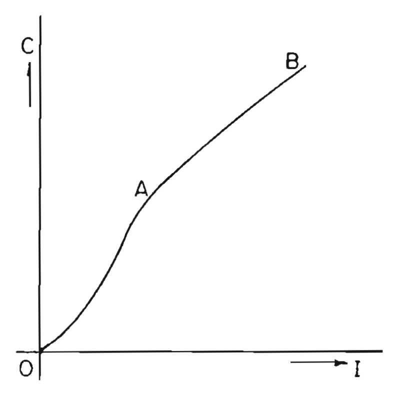


Fig. 151

A curva representada na Fig. 152 evidencia como varia a velocidade da máquina em função do conjugado. Esta curva mostra que para conjugados pequenos a velocidade tende a aumentar enormemente.

Aumentando o conjugado, a velocidade diminui consideravelmente, e por isso o motor de excitação *em série é caracterizado como sendo*

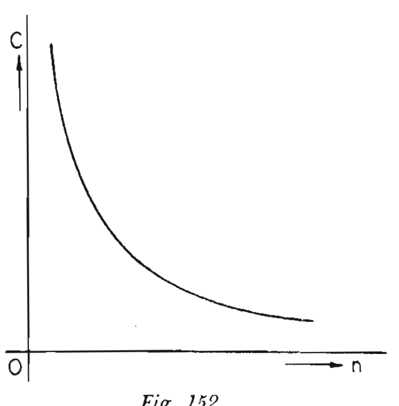


Fig. 152

motor de velocidade variável. Para conjugados pequenos, a velocidade torna-se perigosamente alta. Para velocidades pequenas, como ocorre no arranco, o conjugado é muito elevado, o que permite ao motor ter aplicações em montacargas e na tração elétrica.

Conforme foi observado, o motor com excitação em série adapta automaticamente sua velocidade às variações da carga. Desejando-se, entretanto, maior regulação da mesma, é possível obtê-la através de dois processos básicos, sugeridos pela seguinte fórmula:

$$n = \frac{V - RI}{K\phi}$$

A variação de "n" através da variação do numerador da fração implica na alteração da queda de tensão ôhmica, o que é obtido por meio de resistência em série ao motor. Neste caso, o próprio reostato de partida pode ser utilizado como variador da velocidade do motor.

A regulação da velocidade através do reostato de arranco acarreta perdas de potência muito elevadas, pois as mesmas são proporcionais ao quadrado da corrente absorvida pelo motor (R_aI^2). Tais perdas transformam-se em calor e devem ser irradiadas para o ar, o que obriga a manter, nas devidas proporções, os elementos do reostato R_a.

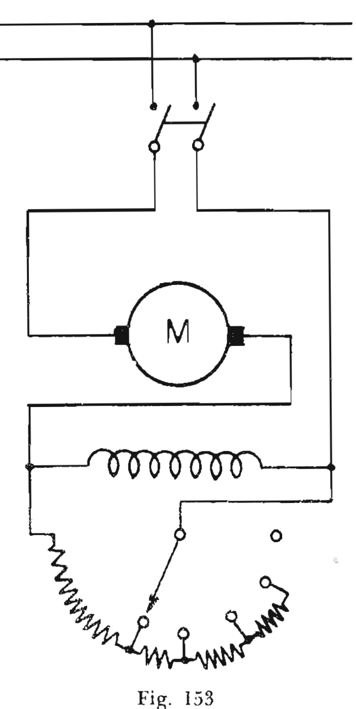


Fig. 153

A velocidade do motor pode, porém, ser regulada, variando-se o denominador da fração acima escrita, isto é, agindo-se sobre o fluxo magnético da máquina. Um dispositivo que permite realizar esta regulação é o indicado na Fig. 153, que consiste em conetar um reostato em paralelo ao circuito de excitação do motor, de forma que possa desviar uma parte da corrente I. Quanto menor for o valor da resistência agrupada, menor será a corrente que atravessa o circuito de excitação, menor será o fluxo magnético e maior a velocidade da máquina.

Outro processo de regulação da velocidade da máquina, por meio da variação de fluxo magnético, consiste em mudar o número de espiras do enrolamento de excitação, conforme Fig. 154.

Um dispositivo prático destinado ao arranco de um motor de excitação em série e regulação de sua velocidade é o indicado na Fig. 155, que atua inserindo resistências ao motor. Este dispositivo consiste num cilindro de material isolante, sobre o qual estão fixadas as placas condutoras, devidamente agrupadas. Sobre este cilindro se apóiam as escovas ligadas ao motor e as resistências. O dispositivo em questão possui 5 posições, sendo elas:

Pos. 0 — Motor desligado da linha.

Pos. 1 — Motor ligado à linha com três resistências em série.

Pos. 2 — Motor ligado à linha com duas resistências em série.

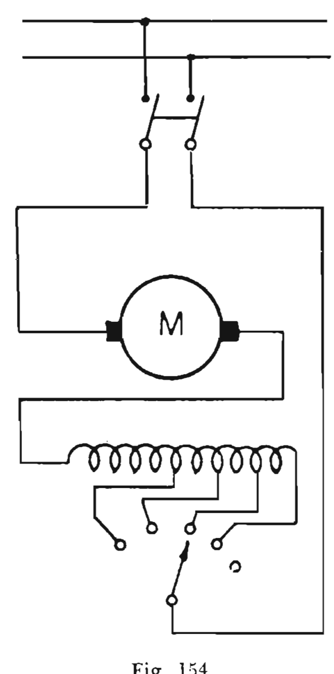


Fig. 154

Pos. 3 — Motor ligado à linha com uma resistência em série.

Pos. 4 — Motor ligado diretamente à linha.

96 — Motor com excitação composta

Nos motores de excitação composta, o fluxo magnético é produzido em parte pelo circuito de excitação em derivação e o restante pelo circuito de excitação em série.

Quando os dois circuitos produzem fluxos concordes, estes se somam e o motor é chamado de motor com excitação composta adicional ou de motor *compound* adicional.

Quando os dois circuitos produzem fluxos em oposição, o fluxo resultante é obtido pela diferença entre os mesmos, e a máquina é chamada de motor com excitação composta diferencial ou de motor *compound* diferencial.

A) *Motor* compound *com fluxo adicional* — No motor *compound* com fluxo adicional, conforme Fig. 156, o fluxo produzido pelo circuito

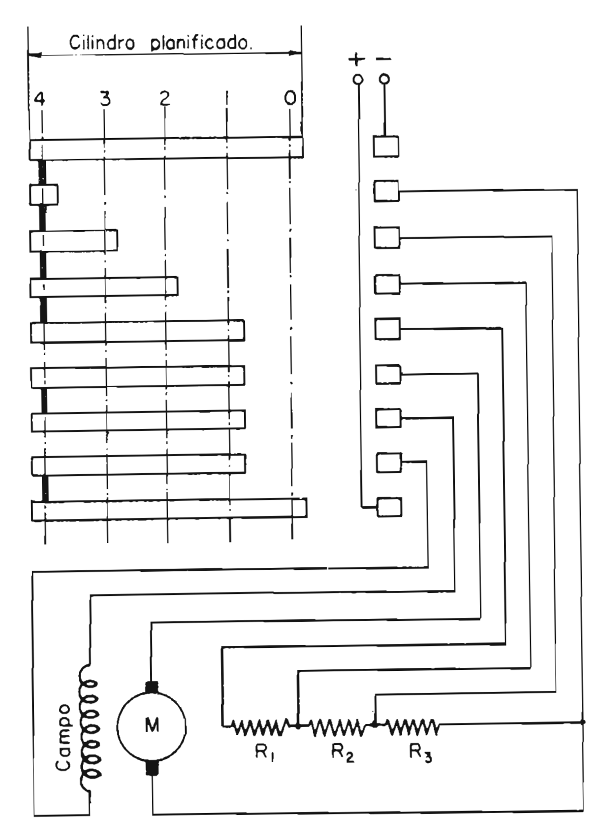


Fig. 155

de excitação em derivação é concorde com o produzido pelo circuito de excitação em série.

O fluxo produzido pelo circuito de excitação em derivação é constante, enquanto o produzido pelo circuito de excitação em série é variável, dependendo do valor da corrente e, por conseguinte, das condições de carga da máquina.

a) *Arranco* — No arranco este motor, como os demais e pelas mesmas razões, necessita de um reostato de partida.

O conjugado resulta elevado, pois nesta fase é considerável a contribuição dada pelo circuito de excitação em série, para reforçar o fluxo.

b) *Funcionamento com carga* — Neste tipo de motor um aumento de carga produz considerável aumento de fluxo magnético e redução da velocidade da máquina. O número de rotações diminui mais acentuadamente que no motor com excitação em derivação.

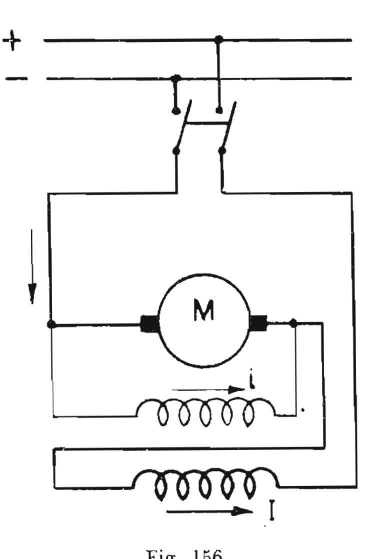


Fig. 156

c) *Funcionamento a vazio* — No funcionamento a vazio é quase nula a participação do circuito de excitação em série, na produção do fluxo e por isso, nesta fase, este motor comporta-se como um motor de excitação em derivação.

Pelo exposto, conclui-se que o motor de excitação composta adicional possui parcialmente as características do motor excitado em série e parcialmente as características do motor excitado em derivação. É aplicado onde se necessita forte conjugado de arranco, diminuição da velocidade ao aumentar da carga, sem que esta, a vazio, possa alcançar valores perigosos.

Um exemplo típico de aplicação deste motor é o de acionamento de laminadores. Neste caso o motor é provido de um volano com dimensões e massa oportunamente proporcionadas. Nos intervalos entre as cargas, o motor fornece ao volano energia cinética. Ao sobrevir uma sobrecarga instantânea, o motor reduz sua velocidade e a sobrecarga é enfrentada pelo volano, à custa da energia cinética que ele armazenou anteriormente. Este jogo de energia faz com que o motor não precise absorver da linha de alimentação toda a energia necessária para a sobrecarga. Assim sendo, com o emprego dos motores de excitação composta de fluxo adicional, eliminam-se das linhas de alimentação os piques de corrente em correspondência com as sobrecargas. Tais piques de corrente, que ocorrem quando se empregam os motores de excitação em derivação, são prejudiciais tanto para as linhas de distribuição como para os geradores de energia elétrica.

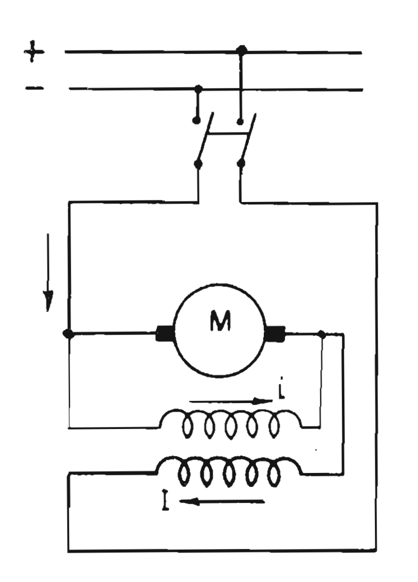


Fig. 157

B) *Motor de excitação composta com fluxo diferencial* — Nos motores de excitação composta com

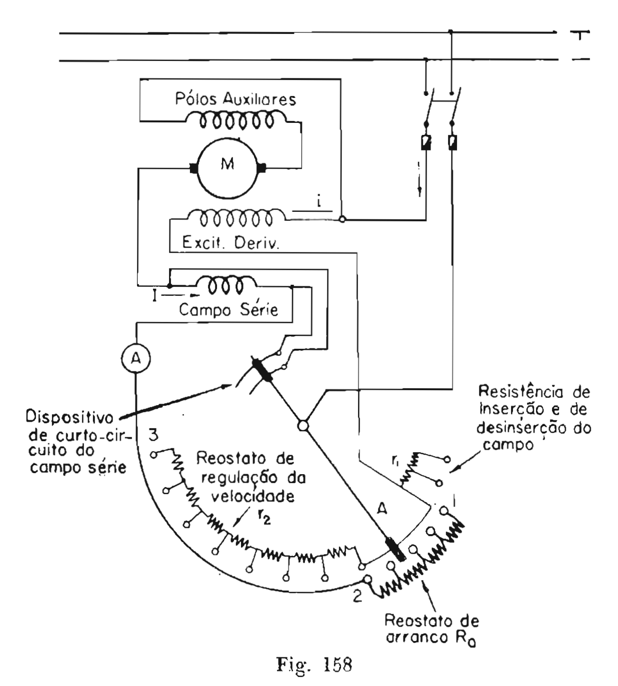


Fig. 158

fluxo diferencial, conforme Fig. 157, o fluxo produzido pelo circuito de excitação em série é oposto ao produzido pelo circuito de excitação em derivação.

Em geral o fluxo produzido pelo circuito de excitação em derivação, que é constante, prevalece sobre o outro, que é variável.

a) *Arranco* — No momento do arranco, sendo elevada a corrente, o fluxo do circuito de excitação em série produz um enérgico efeito desmagnetizante. Esta desmagnetização prejudica o arranco, podendo inclusive provocar a rotação do motor em sentido contrário. A fim de evitar este inconveniente, na fase do arranco, é preciso curto-circuitar o enrolamento de excitação em série, o que é feito com o dispositivo indicado na Fig. 158.

b) *Funcionamento com carga* — O aumento da carga produz um aumento de corrente e, por conseguinte, uma diminuição do fluxo útil da máquina. A diminuição do fluxo compensa o efeito do aumento de queda de tensão e a velocidade da máquina mantém-se praticamente constante, conforme exprime a seguinte equação:

$$n = \frac{V - R_i I}{K \phi}$$

pois o denominador e o numerador diminuem simultaneamente.

Pelo exposto, conclui-se que o motor de excitação composta de fluxo diferencial é utilizado quando se deseja velocidade praticamente constante ao variar a carga. A carga, entretanto, não deve sofrer variações bruscas e de elevado valor, pois se isso ocorrer verifica-se desmagnetização excessiva do motor, com o perigo do mesmo entrar "em fuga".

Pelas razões expostas, o motor de excitação composta de fluxo diferencial não encontra ocupação prática, pois é conveniente substituí-lo pelo motor de excitação em derivação, o qual é caracterizado por um funcionamento mais estável, sem estar sujeito aos riscos acima mencionados.

97 — Reostato de partida com proteção automática

Nos parágrafos anteriores foi visto que no momento da partida dos motores é preciso que o reostato de partida R_a esteja totalmente inserido, a fim de limitar a corrente que de outra forma seria excessiva e por conseguinte perigosa.

Um perigo real para os motores consiste nas faltas ocasionais de energia nas linhas de alimentação, durante as quais o motor pára. Ao voltar a energia, o motor que permanecer conetado com a linha estará diretamente ligado sem usufruir dos benefícios do reostato de partida, o que pode ocasionar a destruição do mesmo.

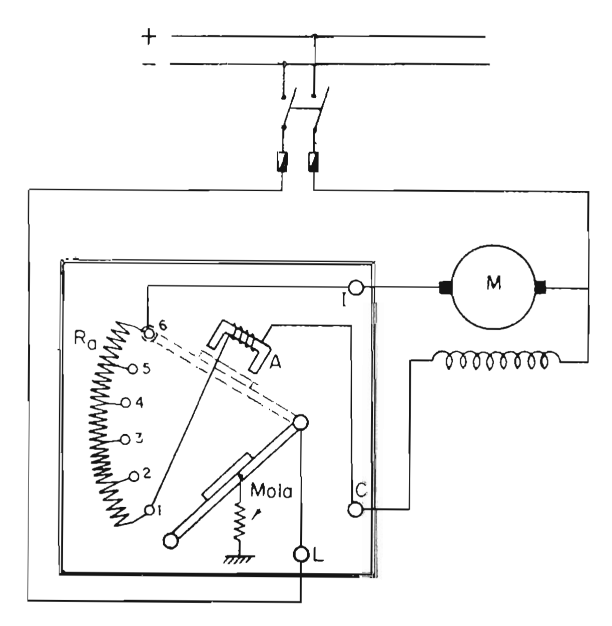


Fig. 159

A fim de se evitar o perigo acima exposto, é preciso que cada motor possua um dispositivo que o desligue da linha de alimentação quando faltar a energia. Desta forma seu reacionamento deverá ser feito através da inclusão do reostato de partida.

Existem vários dispositivos capazes de executar o que acima foi exposto, sendo os mais usados os dois expostos a seguir.

a) *Reostato de partida com proteção automática alimentada por processo amperimétrico* — Este dispositivo, cujo esquema está representado na Fig. 159, é constituído pelo reostato de partida R_a e pelo eletroímã A. Este último é alimentado pela corrente de excitação da máquina e por esta razão o processo de alimentação é denominado de amperimétrico.

O braço de comando do reostato é solicitado, por meio de uma mola, a deslocar-se na posição de repouso, indicada na figura.

Ao se acionar o braço do reostato, este entra em contato com o borne "1", posição em que o circuito de excitação resulta ligado com a linha de alimentação, enquanto o reostato R_a está totalmente inserido no induzido do motor.

Ao aumentar, gradativamente, sua velocidade, o motor gera a f.c.e.m. e o braço do reostato será deslocado para cima, até a posição "6", onde o induzido resulta ligado diretamente com a linha. Nesta posição o braço é retido pelo eletroímã "A", que é alimentado pela corrente do circuito de excitação.

A corrente de excitação atravessa o reostato de partida R_a. Este fato, entretanto, não provoca nenhum inconveniente, pois, sendo esta corrente de intensidade limitada, não chega a criar queda de tensão considerável no reostato R_a, que é proporcionado para a corrente de arranco, cujo valor é pelo menos 20 vezes maior que a de excitação.

Se faltar energia na linha de alimentação, ou se houver uma interrupção acidental do circuito de excitação, o eletroímã "A" deixa de atrair o braço do reostato e este, por efeito da mola, volta à posição inicial, indicada na figura. Ao voltar a energia à linha de alimentação, o motor não corre perigo, pois o mesmo estará desligado e seu acionamento só poderá ser feito através da manobra de inserção do reostato R_a.

b) *Reostato de partida com proteção automática alimentada com processo voltimétrico* — Este dispositivo, representado esquematicamente na Fig. 160, difere do precedente unicamente pelo processo de alimentação do eletroímã de retenção do braço de comando.

No dispositivo indicado na Fig. 159, o eletroímã é alimentado pela corrente de excitação do motor, enquanto no dispositivo indicado na Fig. 160 a alimentação do eletroímã é feita pela própria tensão da linha, de onde provém o nome processo voltimétrico.

A fim de limitar a corrente no eletroímã de retenção do braço de comando, usa-se a resistência "r".

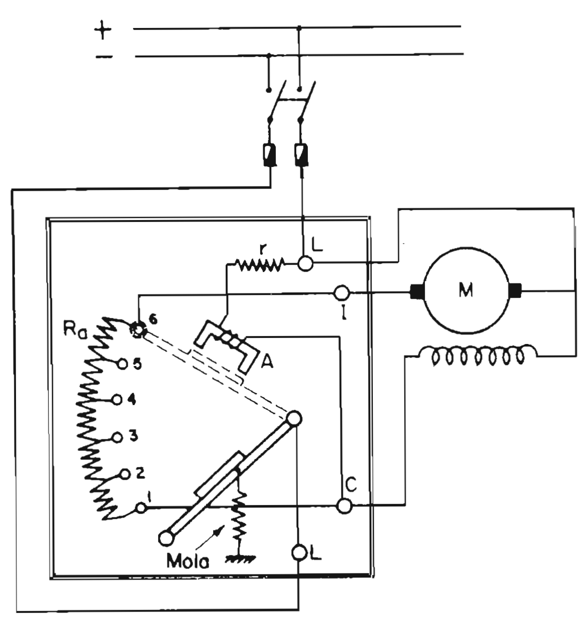


Fig. 160

98 — Cálculo do reostato de partida

Desprezando-se a corrente do circuito de excitação em derivação, o projeto do reostato de partida dos motores de corrente contínua pode obedecer ao seguinte esquema de cálculo.

Conhecida a corrente I que o motor absorve com carga normal, estabelece-se o valor máximo da corrente na fase do arranco, sendo

$$I_M = (1{,}8 \text{ até } 2)\ I$$

O valor mínimo da corrente I_m, na fase do arranco, deve ser próximo do valor de I. Desta forma não se terá uma grande variação de corrente ao se passar do último contato do reostato para a ligação direta do motor.

Em geral

$$I_m = (1 \text{ até } 1{,}2)\ I$$

Se o arranco deve ser enérgico, pode-se escolher $I_m = 1{,}5 \cdot I$ para as primeiras resistências e $I_{m'} = I$ para as últimas.

O cálculo do reostato de partida pode ser feito por processo analítico ou por processo combinado, isto é, analítico-gráfico. O processo analítico obedece ao esquema indicado a seguir:

Com o motor parado, o valor da f.c.e.m. é zero, e o reostato de partida está totalmente inserido. A resistência total do circuito, con-

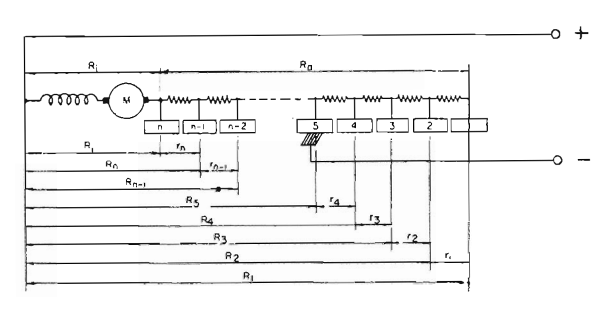


Fig. 161

forme Fig. 161, isto é, a resistência do reostato mais a resistência complexiva interna da máquina, resulta:

$$R_1 = \frac{V}{I_M}$$

Depois do motor ter iniciado o movimento, produz-se em seu induzido a f.c.e.m. E_c e a intensidade da corrente decresce até o valor I_m. Nestas condições, o valor da f.c.e.m. existente no induzido do motor resulta:

$$E_1 = V - I_m \cdot R_1$$

de onde o valor da resistência R_1 resulta:

$$R_1 = \frac{V - E_1}{I_m}$$

Passando ao contato 2, do reostato, para que a corrente não supere o valor I_M, o valor da resistência complexiva deverá ser:

$$R_2 = \frac{V - E_1}{I_M}$$

Das duas relações antes escritas obtém-se

$$\frac{I_m}{I_M} = \frac{R_2}{R_1} = K$$

Com o mesmo procedimento demonstra-se ser:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_3}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} = K$$

de onde as resistências complexivas resultam:

$$R_1 = \frac{V}{I_m}; \; R_2 = R_1 \; K; \; R_3 = R_2 \; K; \; etc.$$

O valor das resistências compreendidas entre os contatos do reostato resulta:

$$r_1 = R_1 - R_2; \; r_2 = R_2 - R_3;$$
$$r_3 = R_3 - R_4; \; etc.$$

O número complexivo das resistências fica determinado pela condição de que a soma satisfaça a

$$\Sigma \, r = R_t - R_i = R_a$$

onde R_t é a resistência complexiva da máquina com o reostato inserido e R_i a resistência interna da máquina englobando a do induzido, a do circuito de excitação em série e a do circuito dos pólos auxiliares.

O processo combinado consiste em traçar o diagrama indicado na Fig. 162. No eixo das abscissas marca-se o segmento "OV" correspondente à tensão de alimentação. No eixo das ordenadas marcam-se os dois segmentos "OI_M" e "OI_m", respectivamente iguais à corrente máxima I_M e à corrente mínima I_m, que se desejam no decorrer da fase do arranco. Conetando I_M com V obtém-se a reta que mostra como varia a corrente ao variar o valor da f.c.e.m. no interior do induzido. Esta reta intercepta a linha horizontal que tem ordenada I_m, no ponto A, definindo o valor da f.c.e.m. E_1 .

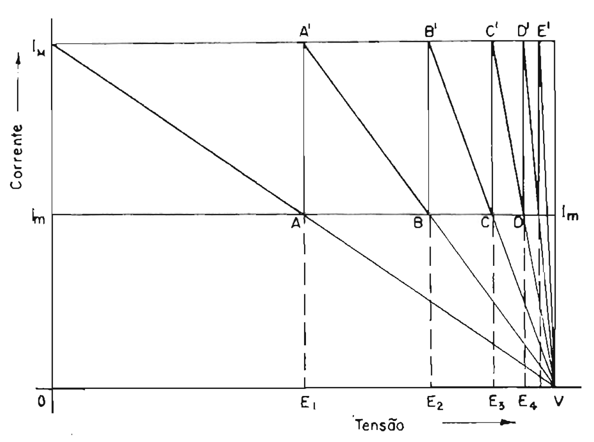


Fig. 162

Passando o braço de comando para a lâmina 2, a corrente no circuito volta ao valor máximo I_M. A velocidade do motor aumenta, aumentando também o valor da f.c.e.m. Com o aumento da f.c.e.m. a corrente diminui, tendo seus valores definidos pela reta A'V. Esta reta intercepta a linha horizontal I_mI_m no ponto B, que define o valor da f.c.e.m. E_2. Deslocando-se o contato do reostato de partida para a lâmina 3, a corrente no circuito volta a adquirir o valor máximo I_M. A reta B'V intercepta a linha horizontal I_mI_m no ponto C, definindo a f.c.e.m. E_3 e assim sucessivamente.

Pelo exposto, o diagrama fornece, por meio de leitura, os valores E_1; E_2; E_3; E_4, etc.

Os valores das resistências R_1; R_2; R_3, etc. são obtidos pelas relações

$$R_1 = \frac{V}{I_M}; \quad R_2 = \frac{V - E_1}{I_M}; \quad R_3 = \frac{V - E_2}{I_M}, \text{ etc.}$$

Os valores das resistências dos vários trechos do reostato resultam:

$$r_1 = R_1 - R_2; \quad r_2 = R_2 - R_3;$$
$$r_3 = R_3 - R_4; \quad r_4 = R_4 - R_5, \text{ etc.}$$

A soma das resistências parciais deve satisfazer a seguinte relação:

$$\Sigma\, r = R_a = R_1 - R_i$$

Exercício 1

Calcular o reostato de partida para um motor que possui as seguintes características:

Tensão de alimentação	$V = 500$ volts
Corrente com carga normal	$I = 35$ ampères
Resistência interna total, induzido e excitação ..	$R_i = 0{,}5$ ohms
Valor máximo da corrente de arranco	$I_M = 56$ ampères
Valor mínimo da corrente de arranco	$I_m = I = 35$ ampères

Solução:

A) *Cálculo analítico*

$$K = \frac{I_m}{I_M} = \frac{35}{56} = 0{,}625$$

$$R_1 = \frac{V}{I_M} = \frac{500}{56} = 8{,}93 \text{ ohms}; \quad R_a = R_1 - R_i = 8{,}93 - 0{,}5 = 8{,}43 \text{ ohms}$$

$R_2 = R_1 \cdot K = 8{,}93 \cdot 0{,}625 = 5{,}58$ ohms;
$R_3 = R_2 \cdot K = 5{,}58 \cdot 0{,}625 = 3{,}48$ ohms;
$R_4 = R_3 \cdot K = 3{,}48 \cdot 0{,}625 = 2{,}175$ ohms;
$R_5 = R_4 \cdot K = 2{,}175 \cdot 0{,}625 = 1{,}36$ ohms;
$R_6 = R_5 \cdot K = 1{,}36 \cdot 0{,}625 = 0{,}85$ ohms;
$R_7 = R_6 \cdot K = 0{,}85 \cdot 0{,}625 = 0{,}53$ ohms;

$r_1 = R_1 - R_2 = 8{,}93 - 5{,}58 = 3{,}35$ ohms
$r_2 = R_2 - R_3 = 5{,}58 - 3{,}48 = 2{,}10$ ohms
$r_3 = R_3 - R_4 = 3{,}48 - 2{,}175 = 1{,}30$ ohms
$r_4 = R_4 - R_5 = 2{,}175 - 1{,}36 = 0{,}82$ ohms
$r_5 = R_5 - R_6 = 1{,}36 - 0{,}85 = 0{,}51$ ohms
$r_6 = R_6 - R_7 = 0{,}85 - 0{,}53 = 0{,}32$ ohms

TOTAL $= 8{,}40$ ohms

A fim de que a resistência total do reostato seja igual a 8,43 ohms, executa-se o último trecho com $r_6 = 0{,}35$ ohms.

B) *Cálculo combinado* — Executa-se o diagrama da Fig. 163, tomando-se por base a tensão $V = 500$ volts, a corrente máxima $I_M = 56$ ampères e a corrente mínima $I_m = 35$ ampères.

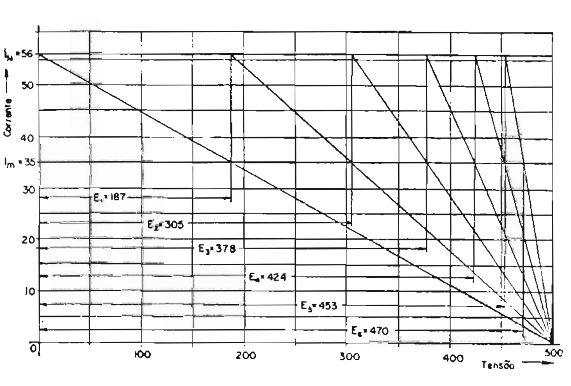


Fig. 163

Solução:

$$R_1 = \frac{V}{I_M} = \frac{500}{56} = 8{,}93 \text{ ohms}; R_a = R_1 - R_i = 8{,}93 - 0{,}5 = 8{,}43 \text{ ohms}$$

O diagrama fornece as f.c.e.m. E_1; E_2; E_3; E_4; E_5 e E_6

$$E_1 = 187; \; R_2 = \frac{500 - 187}{56} = 5{,}58 \text{ ohms};$$

$$r_1 = R_1 - R_2 = 8{,}93 - 5{,}58 = 3{,}35 \text{ ohms}$$

$$E_2 = 305; \ R_3 = \frac{500 - 305}{56} = 3{,}48 \text{ ohms};$$

$$r_2 = R_2 - R_3 = 5{,}58 - 3{,}48 = 2{,}10 \text{ ohms}$$

$$E_3 = 378; \ R_4 = \frac{500 - 378}{56} = 2{,}179 \text{ ohms};$$

$$r_3 = R_3 - R_4 = 3{,}48 - 2{,}179 = 1{,}30 \text{ ohms}$$

$$E_4 = 424; \ R_5 = \frac{500 - 424}{56} = 1{,}36 \text{ ohms};$$

$$r_4 = R_4 - R_5 = 2{,}179 - 1{,}36 = 0{,}82 \text{ ohms}$$

$$E_5 = 453; R_6 = \frac{500 - 453}{56} = 0{,}84 \text{ ohms};$$

$$r_5 = R_5 - R_6 = 1{,}36 - 0{,}84 = 0{,}52 \text{ ohms}$$

$$E_6 = 470; \ R_7 = \frac{500 - 470}{56} = 0{,}53 \text{ ohms};$$

$$r_6 = R_6 - R_7 = 0{,}84 - 0{,}53 = 0{,}31 \text{ ohms}$$

$$\text{TOTAL} \qquad = 8{,}40 \text{ ohms}$$

Executa-se a resistência $r_6 = 0{,}34$ ohms, de maneira que resulte:

$$\Sigma r = R_a = 8{,}43 \text{ ohms}$$

Exercício 2

Calcular o reostato de partida de um motor que possui as seguintes características:

Tensão	$V = 450$ volts
Corrente	$I = 435$ ampères
Resistência interna total	$R_1 = 0{,}026$ ohms

Valor máximo da corrente de partida

$$I_M = 2 \cdot I = 2 \cdot 435 = 870 \text{ ampères}$$

Valor mínimo da corrente de partida na fase inicial

$$I'_m = 1{,}5 \cdot I = 650 \text{ ampères}$$

Valor mínimo da corrente de partida na fase final

$$I''_m = I = 435 \text{ ampères}$$

Solução:

Não sendo constante o valor mínimo I_m da corrente, o cálculo analítico do reostato é muito difícil e laborioso, por isso opta-se para o cálculo combinado.

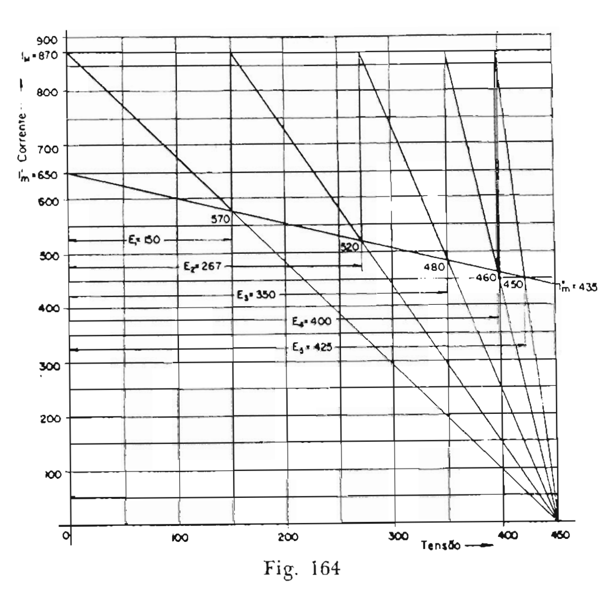


Fig. 164

$$R_1 = \frac{V}{I_M} = \frac{450}{870} = 0{,}517 \text{ ohms};$$

$$R_a = R_1 - R_i = 0{,}517 - 0{,}026 = 0{,}491 \text{ ohms}$$

Do diagrama resulta:

$$E_1 = 150; \; R_2 = \frac{450 - 150}{870} = 0{,}345 \text{ ohms};$$

$$r_1 = R_1 - R_2 = 0{,}517 - 0{,}345 = 0{,}172 \text{ ohms}$$

$$E_2 = 267; \; R_3 = \frac{450 - 267}{870} = 0{,}21 \text{ ohms};$$

$$r_2 = R_2 - R_3 = 0{,}345 - 0{,}21 = 0{,}135 \text{ ohms}$$

$$E_3 = 350; \; R_4 = \frac{450 - 350}{870} = 0{,}114 \text{ ohms};$$

$$r_3 = R_3 - R_4 = 0{,}21 - 0{,}114 = 0{,}096 \text{ ohms}$$

$$E_4 = 400; \quad R_5 = \frac{450 - 400}{870} = 0{,}057 \text{ ohms};$$

$$r_4 = R_4 - R_5 = 0{,}114 - 0{,}057 = 0{,}057 \text{ ohms}$$

$$E_5 = 425; \quad R_6 = \frac{450 - 425}{870} = 0{,}03 \text{ ohms};$$

$$r_5 = R_5 - R_6 = 0{,}057 - 0{,}03 = 0{,}027 \text{ ohms}$$

A fim de que a resistência total do reostato resulte $R_a = 0{,}491$ ohms, executa-se o último trecho do mesmo $r_6 = 0{,}031$ ohms.

99 — Partida automática

Para motores de grande potência, e para motores instalados em local de difícil acesso, empregam-se dispositivos automáticos de partida, capazes de dispensar o operador. Tais dispositivos, acionados pela corrente absorvida pelo motor, efetuam a inserção progressiva do reostato.

Existem vários tipos de dispositivos automáticos de partida para motores de corrente contínua, sendo os mais usados os de ação eletromagnética representados nas Figs. 165 e 166.

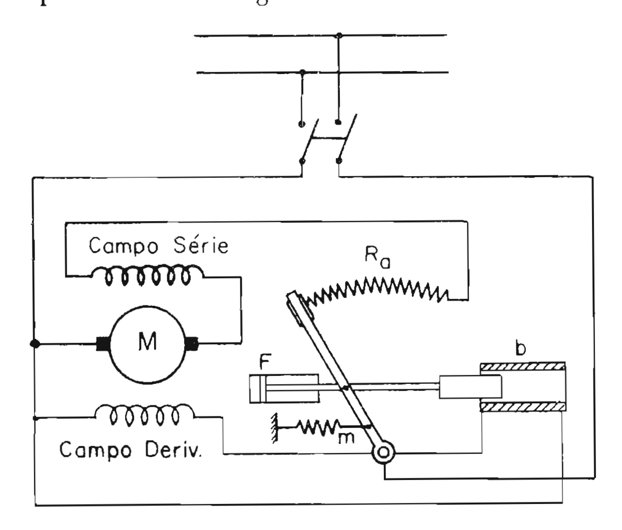


Fig. 165

O dispositivo indicado na Fig. 165 é acionado pela bobina *b,* ao se fechar o interruptor que comanda o motor. Sua ação não é instantânea, pois o freio de retardamento *F* faz com que seu deslocamento se processe lentamente.

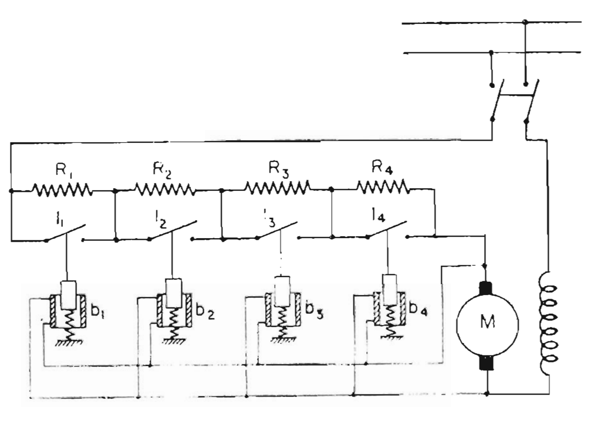


Fig. 166

Se faltar a tensão da linha de alimentação, a mola *m* desloca o braço do reostato de maneira que este resulte totalmente inserido no motor.

O esquema da Fig. 166 representa o dispositivo automático de partida, de efeito eletromagnético, aplicado, por exemplo, a um motor de excitação em série.

O reostato em questão é constituído por quatro resistências, R_1, R_2, R_3 e R_4, curto-circuitadas pelos interruptores I_1, I_2, I_3 e I_4, acionados pelos eletroímãs b_1, b_2, b_3 e b_4 ligados em derivação com as escovas do motor. Os eletroímãs são regulados de forma que os interruptores se fechem sucessivamente com o aumento da tensão que os alimenta.

No momento da partida, todos os interruptores estão abertos e portanto todas as resistências estão inseridas. A corrente de partida, ao atravessar as resistências, produz uma elevada queda de tensão, resultando pequena a diferença de potencial nas escovas do motor e por conseguinte nos bornes das bobinas. Nestas condições, os interruptores permanecem abertos na fase inicial de partida.

Ao aumentar a velocidade do motor, aumenta a f.c.e.m. no mesmo, diminui a corrente absorvida e correspondentemente a queda nas resistências inseridas. A tensão existente nas escovas do motor aumenta gradativamente, o que permite ao eletroímã mais sensível, o I_1, fechar-se.

Com o fechamento do interruptor I_1 a resistência R_1 resulta excluída do circuito, e a resistência total em série com o motor resulta: $R_2 + R_3 + R_4$. A diminuição da resistência inserida provoca aumento da velocidade do motor, com conseqüente aumento da tensão nas escovas.

O aumento progressivo da tensão nas escovas do motor provoca o fechamento progressivo dos interruptores I_2, I_3 e I_4, resultando por fim o motor diretamente ligado à linha de alimentação.

100 — Esquema de cálculo para projeto de um motor de corrente contínua

Do que foi exposto nos parágrafos precedentes, o motor de corrente contínua apresenta, em seu funcionamento, os mesmos fenômenos que os dínamos, isto é, reação do induzido, comutação, perdas de potência e por fim geração de uma f.c.e.m. que se opõe à tensão de alimentação.

Estruturalmente nenhuma diferença existe entre um motor de corrente contínua e um dínamo, a não ser detalhes de funcionamento, tais como:

a) *Deslocamento do plano de inversão magnética* — Nos dínamos tal deslocamento processa-se no sentido do movimento, enquanto que nos motores ele se dá em sentido contrário ao do movimento.

b) *Polaridade dos pólos auxiliares* — Nos dínamos, cada pólo auxiliar possui a mesma polaridade do pólo principal, que o segue na rotação, enquanto nos motores a polaridade de cada pólo auxiliar é a mesma da do pólo principal, que o antecede na rotação.

c) *Fenômenos de indução eletromagnética* — Os dínamos devem gerar uma f.e.m., cujo valor é maior do que o da tensão nominal existente nos bornes da máquina, pois esta f.e.m. deve compensar as quedas de tensão R_iI que se verificam no circuito interno da mesma, sendo

$$E_d = V_d + R_iI$$

Nos motores a f.c.e.m. a ser gerada é inferior ao valor da tensão aplicada nos bornes da máquina. O valor desta f.c.e.m. é obtido subtraindo-se o valor das quedas de tensões internas R_iI do valor da tensão aplicada, isto é:

$$E_{mot} = V - R_iI$$

Pelo exposto, o esquema de cálculo de um motor é idêntico ao de um dínamo de igual potência que deve produzir uma f.e.m. de valor igual à da f.c.e.m. do motor, conforme mostra o exemplo indicado a seguir.

101 — Exercício de aplicação n. 1

Exemplo de cálculo parcial de um motor de corrente contínua com os seguintes dados:

Potência mecânica fornecida	cv	= 70
Tensão de alimentação	V	= 180 volts
Rotações por minuto	n	= 800 r.p.m
Tipo de excitação	Derivação	

Solução:

A) *Determinação do diâmetro, comprimento do induzido e número dos pólos* — A potência em watts, fornecida pelo motor, resulta:

$$W = 70 \cdot 736 = 51\,520 \text{ watts}$$

à relação

$$\frac{W}{n} = \frac{51\,520}{800} = 64{,}4$$

Com o auxílio da tabela da Fig. 122, estabelece-se o diâmetro externo do induzido $D = 40$ cm, o número dos pólos $2p = 4$ e a indução no entreferro $B_e = 7650$.

A velocidade periférica do induzido resulta:

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 0{,}40 \cdot 800}{60} = 16{,}74 \text{ m/seg}$$

A esta velocidade, na tabela da Fig. 126, corresponde o coeficiente de utilização $C = 450$.

Sendo a potência nominal da máquina $W = 70$ cv $= 51\,520$ watts, da Fig. 121 resulta o valor do rendimento $\mu = 0{,}87$. A potência interna da máquina é:

$$W_i = \frac{51\,520}{0{,}87} = 59\,218 \text{ watts}$$

O fator volumétrico resulta:

$$M = \frac{W_i}{n} \cdot C = \frac{59\,218}{800} \cdot 450 = 33\,300 \text{ aprox.}$$

$$\text{de onde } L_m = \frac{M}{D^2} = \frac{33\,300}{40^2} = 20{,}81 \text{ cm aprox.}$$

$$\text{O passo polar } \tau = \frac{\pi \cdot D}{2p} = \frac{\pi \cdot 40}{4} = 31{,}4 \text{ cm.}$$

A relação $\dfrac{L_m}{\tau} = \dfrac{20{,}81}{31{,}4} = 0{,}662$, valor aceitável, conforme parágrafo 82.

B) *Determinação do fluxo* — Para que o induzido tenha comprimento magnético $L_m = 20{,}81$ cm, o comprimento do pacote laminado deve ser de $20{,}81 \cdot 1{,}1$. Executando-se a carcaça induzida com dois canais de ventilação de 1 cm de comprimento, o comprimento total da carcaça induzida resulta: $L = 20{,}81 \cdot 1{,}1 + 2 = 24{,}89$ cm. A mencionada carcaça é fabricada conforme a Fig. 167, resultando $L_m = 20{,}9$ cm.

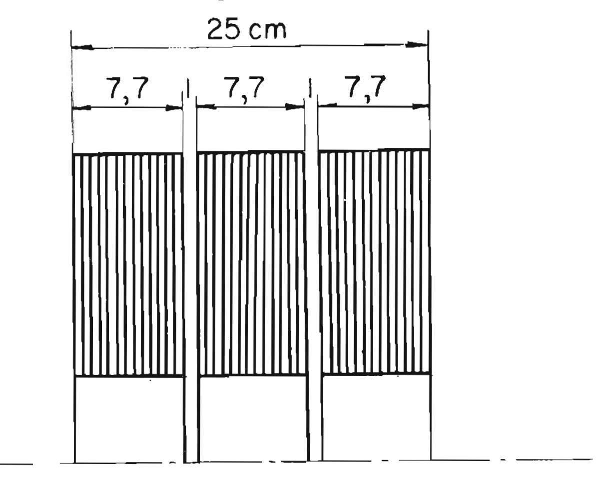


Fig. 167

O comprimento axial da expansão polar é igual ao comprimento geométrico do induzido, isto é, 25 cm. A relação entre o arco polar da expansão e o passo polar, conforme parágrafo 76, é considerada $\psi = 0{,}65$. Nestas condições a seção superficial da expansão resulta:

$$S_p = L \cdot \psi \cdot \tau = 25 \cdot 0{,}65 \cdot 31{,}4 = 510 \text{ cm}^2$$

Tendo-se escolhido, na Fig. 122, o valor de $B = 7650$, o fluxo resulta:

$$\phi = S_p \cdot B_e = 510 \cdot 7650 = 39 \cdot 10^5 \text{ maxwell aprox.}$$

C) *Enrolamento induzido* — A f.c.e.m. a ser gerada pelo motor corresponde à tensão aplicada, deduzida das quedas de tensão interna da máquina (induzido, coletor e pólos auxiliares). Sendo o motor em exame de excitação em derivação, considera-se a queda total de tensão correspondente a 5% do valor da tensão nominal da alimentação da máquina. Assim sendo, o valor da f.c.e.m. que o motor deve gerar resulta:

$$E_c = V \cdot 0{,}95 = 180 \cdot 0{,}95 = 171 \text{ volts}$$

A corrente absorvida pelo induzido da máquina resulta:

$$I = \frac{W_i}{V} = \frac{59\,218}{180} = 330 \text{ ampères aprox.}$$

Executa-se o enrolamento induzido com $2a = 4$, isto é, imbricado. Lembrando que no motor de excitação em derivação a corrente de excitação é fornecida pela linha de alimentação, a corrente em cada via interna do induzido resulta:

$$I_a = \frac{330}{4} = 82{,}5 \text{ ampères}$$

O número provável dos condutores do induzido é:

$$N_c = \frac{10^8 \cdot E_c \cdot 60}{n \cdot \phi} = \frac{10^8 \cdot 171 \cdot 60}{800 \cdot 39 \cdot 10^5} = 328 \text{ aprox.}$$

Executando-se o enrolamento com barras, de forma que resulte uma espira em cada bobina e colocando-se 6 condutores em cada ranhura, o número de ranhuras resulta:

$$N_R = \frac{328}{6} = 54{,}6$$

O induzido é executado com 54 ranhuras.

O número efetivo de condutores do induzido é $54 \cdot 6 = 324$ e o número das lâminas do comutador $Z = 324/2 = 162$.

Sendo o enrolamento imbricado, os passos do mesmo resultam:

$$Y_1 = \frac{F - b}{2p} - 1 = \frac{324 - 4}{4} = 79; \quad Y_n = \frac{Y_1 - 1}{m} = \frac{79 - 1}{6} = 13$$

$$Y_2 = \frac{F - b}{2p} + 1 = 81$$

A profundidade da ranhura, conforme tabela da Fig. 122, por $\frac{W}{n} = 64{,}4$ resulta $h_R = 32$ mm aprox. Sendo a corrente em cada via interna $I_a = 82{,}5$ ampères, na tabela da Fig. 96, por $v = 14{,}65$ m/seg. obtém-se: $\delta = 4$ A/mm²; a seção dos condutores resulta:

$$S_c = \frac{I_a}{\delta} = \frac{82{,}5}{4} = 20{,}6 \text{ mm}^2$$

Usam-se condutores de 11 × 1,9 mm, cuja seção, tendo em vista os cantos arredondados, considera-se $S_c = 20,6\ mm^2$.

O revestimento do condutor é feito com cadarço de 0,2 mm de espessura, o qual ao ser enrolado sobrepõe-se uma só vez, pelo que a espessura do revestimento, em cada lado, é 0,4 mm.

Os três condutores da camada superior são separados dos da camada inferior por meio de um diafragma de prespan com 0,8 mm de espessura. O isolamento da ranhura também é feito com prespan de 0,8 mm de espessura.

A disposição dos condutores e do respectivo isolamento, na ranhura, é feito conforme Fig. 168.

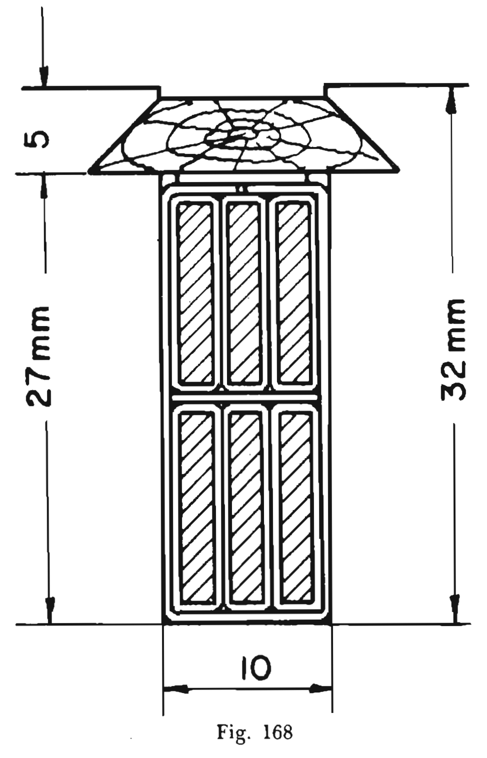


Fig. 168

Embaixo da tampa de madeira coloca-se uma tira de prespan com 0,6 mm de espessura.

Largura da ranhura

Condutores	3 × 1,9 =	5,7 mm.
Algodão	6 × 0,4 =	2,4 mm.
Prespan	2 × 0,8 =	1,6 mm.
Folga	=	0,3 mm.
	b_R =	10,0 mm.

Profundidade da ranhura

Condutores	2 × 11 =	22,0 mm.
Algodão	4 × 0,4 =	1,6 mm.
Prespan	3 × 0,8 =	2,4 mm.
Prespan debaixo da tampa	=	0,6 mm.
Folga	=	0,4 mm.
	h_R =	27,0 mm.

Passo às ranhuras na periferia do rotor

$$\tau_R = \frac{\pi \cdot D}{N_R} = \frac{3,14 \cdot 40}{54} = 2,32 \text{ cm} = 23,2 \text{ mm}$$

Espessura da cabeça do dente: b' = 23,2 − 10 = 13,2 mm = 1,32 cm

Passo às ranhuras na base do dente

$$\tau'_R = \frac{\tau(D - 2h_R)}{N_R} = \frac{3,14(40 - 2 \cdot 3,2)}{54} = 1,95 \text{ cm} = 19,5 \text{ mm}$$

Espessura da base do dente b'' = 19,5 − 10 = 9,5 mm = 0,95 cm

$$\text{Número de dentes por pólo} = \frac{54}{4} = 13,5$$

Número de dentes embaixo de uma expansão polar

$$X_d = 13,5 \cdot 0,65 = \sim 8,75.$$

Seção do dente na base

$$S'_d = (b'' \cdot L_m)\ X_d = 0,95 \cdot 20,9 \cdot 8,75 = \sim 173 \text{ cm}^2$$

Indução na base do dente $= \dfrac{\phi}{S'_d} = \dfrac{39 \cdot 10^5}{173} = \sim 22\,500$, valor aceitável, conforme parágrafo 74.

O cálculo do motor prossegue conforme o esquema exposto para o dínamo no parágrafo 83.

102 — Exercício de aplicação n. 2

Exemplo de cálculo parcial de um motor de corrente contínua com os seguintes dados:

Potência fornecida W = 4,25 cv;
Tensão V = 38 volts.
Velocidade n = 1800 r.p.m;
Excitação: em derivação.

Este exercício de aplicação tem a finalidade de mostrar como agir no caso de motores pequenos, quando é preciso utilizar lâminas rotóricas já existentes, que possuem diâmetro levemente diferente do valor obtido pelo cálculo.

Solução:

A) *Determinação do diâmetro, comprimento do induzido e número de pólos.* — A potência em watts fornecida pelo motor é

$$W = 4{,}25 \cdot 736 = 3128 \text{ watts.}$$

A relação $\dfrac{W}{n} = \dfrac{3128}{1800} = 1{,}73$

Da tabela da Fig. 122 resulta que o diâmetro do induzido deve ser inferior a 15 cm. Se não existir lâmina com este diâmetro, deverá ser escolhida uma cujo diâmetro seja inferior, mas próxima de 15 cm, como por exemplo a indicada na Fig. 169, que possui diâmetro de 14,5 cm e 33 ranhuras. Esta lâmina é diretamente prensada no eixo do motor, apresentando por isso, como superfície de irradiação, a cilíndrica externa e as duas frontais. Em geral os núcleos dos pequenos rotores não possuem canais radiais de ventilação.

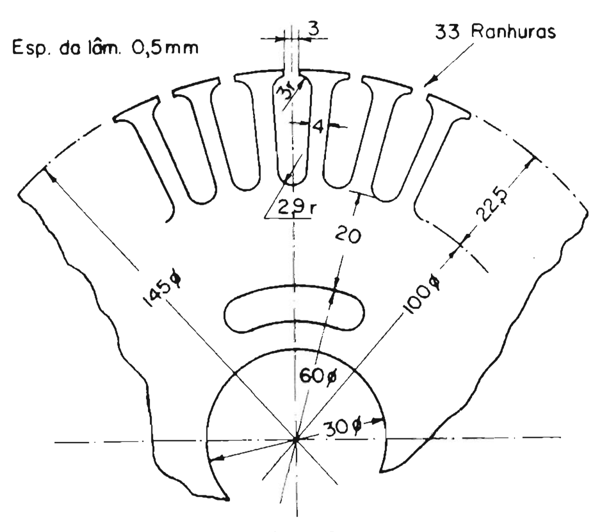


Fig. 169

Os dois canais axiais de ventilação, visíveis na Fig. 169, não devem ser computados nas superfícies de irradiação.

Escolhida a lâmina com 14,5 cm de diâmetro, fica determinado também o valor da indução B = 5000 gauss.

A velocidade periférica do induzido resulta:

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 0{,}145 \cdot 1800}{60} = 13{,}66 \text{ m/seg}$$

A esta velocidade, na tabela da Fig. 126 corresponde o coeficiente de utilização $C = 1163$.

Sendo a potência nominal da máquina $W = 4{,}25$ cv $= 3128$ watts, da Fig. 121 resulta o rendimento $\mu = 0{,}8$. A potência interna da máquina é:

$$W_i = \frac{3128}{0{,}8} = 3910 \text{ watts.}$$

O fator volumétrico resulta:

$$M = \frac{W_i}{n} C = \frac{3910}{1800} \cdot 1163 = 2525$$

de onde

$$L_m = \frac{M}{D^2} = \frac{2525}{14{,}5^2} = \sim 12 \text{ cm}$$

Executando-se o motor com dois pólos

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2p} = \frac{3{,}14 \cdot 14{,}5}{2} = 22{,}76 \text{ cm}$$

A relação

$$\frac{L_m}{\tau} = \frac{12}{22{,}76} = \sim 0{,}52,$$

valor aceitável, conforme parágrafo 82.

O induzido é executado com o comprimento geométrico de $L = 13$ cm.

B) *Enrolamento do induzido* — A corrente absorvida pela máquina é

$$I = \frac{W_i}{V} = \frac{3910}{38} = \sim 103 \text{ amp.}$$

A corrente em cada via interna do induzido resulta:

$$I_a = \frac{103}{2} = 51{,}5 \text{ amp.}$$

Da tabela da Fig. 96, sendo $v = 13{,}66$ resulta $\delta = \sim 4$ amp/mm². A seção dos condutores resulta $\dfrac{51{,}5}{4} = \sim 13 \text{ mm}^2$.

Por meio de prova prática observa-se que na ranhura podem ser colocadas 4 barras de 2×8 mm. A seção de cada barra é de 16 mm² e portanto a densidade de corrente na mesma resulta

$$\delta = \frac{51,5}{16} = 3,2 \text{ amp/mm}^2.$$

Este valor é aceitável conforme tabela da Fig. 96.

Sendo a máquina bipolar, o enrolamento induzido pode ser executado indiferentemente no tipo ondulado ou imbricado. O enrolamento induzido terá uma espira por bobina e assim sendo o número de condutores induzidos resulta: $N_c = 33 \cdot 4 = 132$.

O número das espiras será 66 e o comutador terá 66 lâminas. O número dos amp/cond/cm na periferia do induzido resulta:

$$A = \frac{N_c \cdot I_a}{\pi \cdot D} = \frac{132 \cdot 51,5}{\pi \cdot 14,5} = \sim 149$$

C) *Cálculo do fluxo* — A f.c.e.m. que o motor deve gerar é obtida deduzindo-se da tensão V a queda de tensão que se verifica no contato escovas-comutador (1,3 volts pelas escovas de carvão-grafita) e a que se verifica no induzido (10% de V), resultando então:

$$E = V - (1,3 + V/10) = 38 - (1,3 + 3,8) = \sim 33 \text{ volts}$$

O fluxo necessário para gerar esta f.c.e.m. é:

$$\phi = \frac{10^8 \cdot E_c \cdot 60 \cdot a}{n \cdot N_c \cdot p} = \frac{10^8 \cdot 33 \cdot 60}{1800 \cdot 132} = 833\,333 \text{ maxwell}$$

Fixando-se o arco da expansão polar igual a 0.65 τ, a seção periférica da expansão resulta:

$$S_p = L_m \cdot \psi \cdot \tau = 12 \cdot 0,65 \cdot 22,76 = 178 \text{ cm}^2$$

A indução resulta:

$$B_c = \frac{\phi}{S_p} = \frac{178}{833\,333} = \sim 4700 \text{ gauss}$$

O cálculo do motor prossegue conforme o esquema exposto para o dínamo, no parágrafo 83. Tendo-se presente que este motor não possui pólos auxiliares, suas escovas deverão ser deslocadas em sentido contrário ao da rotação. Tal deslocamento é aproximadamente de 2 lâminas do comutador.

103 — Exercício de aplicação n. 3

Exemplo de cálculo de motor de corrente contínua, destinado ao acionamento de um eletroventilador, com os seguintes dados:

Potência mecânica fornecida = 80 watts

Velocidade = 3500 r.p.m

Tensão de alimentação = 24 volts

Excitação: em série.

Este exercício de aplicação tem a finalidade de mostrar como executar o cálculo para motores de pequena potência, nos quais, quase sempre, é preciso utilizar lâminas existentes, cujo diâmetro é diferente do calculado.

Nos motores de pequena potência, em virtude da facilidade de irradiação do calor, é possível adotar em seus condutores densidades de corrente até 6,5 amp/mm².

Solução:

A) *Determinação do diâmetro, comprimento do induzido e número de pólos.*

A relação

$$\frac{W}{n} = \frac{80}{3500} = 0{,}023.$$

Este valor, sendo muito pequeno, não é encontrado na tabela da Fig. 122. O cálculo deve ser executado da seguinte forma:

Nos motores de pequena potência, em geral, o comprimento do induzido é levemente inferior ao diâmetro. Como primeiro cálculo, aproximado, pode-se considerar D = L e portanto $D = \sqrt[3]{M}$.

O cálculo do coeficiente de utilização é feito escolhendo-se os valores de A e de B em relação à potência do motor. Para motores com potência próxima de 100 watts, $B_c = \sim 4400$ gauss, enquanto o valor de A deve ser escolhido entre os seguintes:

Para induzidos enrolados com fio esmaltado A = 110.

Para induzidos enrolados com fio coberto com algodão A = 90.

Tendo o motor em questão o induzido com fio coberto com algodão, considera-se A = 90, e o coeficiente de utilização resulta:

$$C = \frac{10^8 \cdot 60}{\tau^2 \psi \cdot A\ B_c} = \frac{10^8 \cdot 60}{9{,}86 \cdot 0{,}7 \cdot 90 \cdot 4400} = \sim 2200$$

O rendimento destes motores de pequena potência é da ordem de 0,5. A potência interna do motor resulta:

$$W_i = \frac{W_i}{\mu} = \frac{80}{0,5} = 160 \text{ watts.}$$

O coeficiente volumétrico resulta:

$$M = \frac{W_i}{n} C = \frac{160}{3500} 2200 = \sim 100$$

O valor aproximado do diâmetro do induzido é

$$\sqrt{100} = 4,64 \text{ cm}$$

Escolhe-se D = 5 cm, pois existem lâminas com este diâmetro, conforme Fig. 170, que possuem 12 ranhuras. O comprimento magnético do induzido

$$L_m = \frac{100}{5^2} = 4 \text{ cm}$$

O comprimento geométrico do induzido resulta L = 4,4 cm.

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2p} =$$

$$= \frac{3,14 \cdot 5}{2} = 7,85 \text{ cm}$$

A relação

$$\frac{L_m}{\tau} = \frac{4}{7,85} = 0,51,$$

é aceitável.

A corrente absorvida pelo motor é

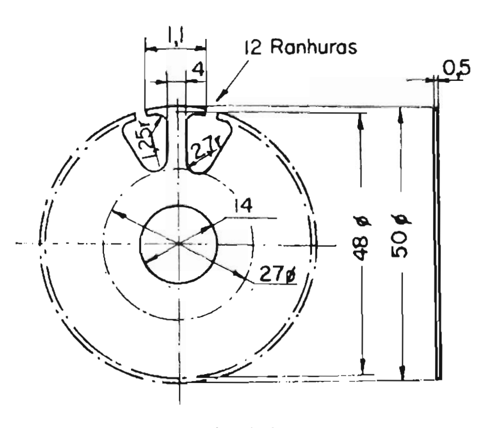


Fig. 170

$$I = \frac{W_i}{V} = \frac{160}{24} = 6,65 \text{ ampères.}$$

Tendo o motor 2 pólos e por conseguinte o induzido duas vias internas, a corrente nos condutores resulta:

$$I_a = \frac{I}{2} = \frac{6,65}{2} = 3,32 \text{ ampères.}$$

Fixando-se a densidade de corrente $\delta = 6,5$ amp/mm² a seção do condutor resulta:

$$S_c = \frac{I_a}{\delta} = \frac{3,32}{6,5} = 0,51 \text{ mm}^2$$

Usa-se fio n.º 20 (AWG) isolado com esmalte e algodão ($S = 0,518$ mm²). Em cada ranhura podem ser colocados 32 condutores, divididos em 4 elementos com 8 condutores cada. O número dos elementos é $12 \cdot 4 = 48$, resultando 24 o número das lâminas do comutador. O número dos condutores ativos é $N_c = 12 \cdot 32 = 384$ e o das espiras $N_s = 192$.

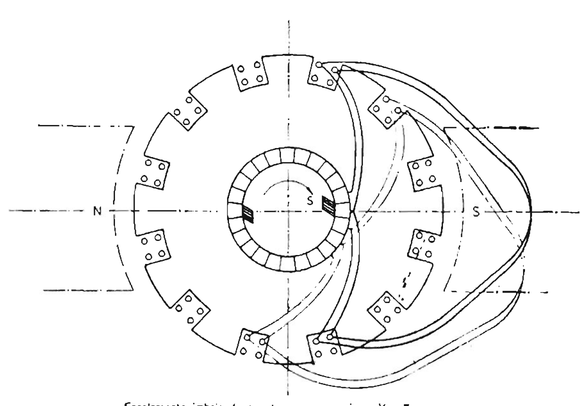
Executando-se o enrolamento imbricado progressivo com passo reduzido obtém-se:

$$Y_1 = \frac{F - b}{2p} + 1 = \frac{48 - 8}{2} + 1 = 21$$

$$Y_n = \frac{Y_1 - 1}{m} = \frac{21 - 1}{4} = 5$$

$$Y_2 = 19$$

O esquema do enrolamento induzido está indicado na Fig. 171.



Enrolamento imbricado simples ; progressivo ; Yn = 5.
Escovas sobre o eixo polar ; Sentido da rotação – seta S.
Centro da lâmina do comutador em correspondência do centro do dente da coroa rotórica.

Fig. 171

$$A = \frac{N_c I_a}{\pi \cdot D} = \frac{384 \cdot 3{,}32}{3{,}14 \cdot 5} = \sim 81$$

Nos pequenos motores, podendo-se manter a densidade de corrente elevada, a queda de tensão é, porcentualmente, maior do que aquela que se verifica nos motores de média e grande potência.

O comprimento do fio enrolado resulta:

$$L_f = (2L + 2{,}8\ \tau)\ N_s = (2 \cdot 4{,}4 + 2{,}8 \cdot 7{,}85)\ 192 = 5914 \text{ cm} = \sim 60 \text{ m}$$

A resistência do fio é:

$$R_f = \frac{0{,}0216 \cdot 60}{0{,}518} = \sim 2{,}5 \text{ ohms, de onde}$$

$$R_i = \frac{R_f}{(2a)^2} = \frac{2{,}5}{2^2} = 0{,}625 \text{ ohms}$$

A queda de tensão interna do induzido é $R_i \cdot I = 0{,}625 \cdot 6{,}65 = 4{,}15$ volts.

As perdas por efeito joule resultam:

$$R_i \cdot I^2 = 0{,}625 \cdot 6{,}65^2 = 27{,}64 \text{ watts.}$$

B) *Comutador* – Escolhe-se como diâmetro da superfície de trabalho do comutador $D_c = 38$ mm, enquanto o comprimento do mesmo é 20 mm.

$$v_c = \frac{\pi \cdot D_c \cdot n}{60} = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}038 \cdot 3500}{60} = \sim 7 \text{ m/seg}$$

O passo ao comutador é

$$\tau_c = \frac{\pi \cdot D_c}{Z} = \frac{3{,}14 \cdot 38}{24} = \sim 5 \text{ mm}$$

Sendo a espessura da mica de 0,8 mm, a espessura da lâmina, na superfície de trabalho, é $5 - 0{,}8 = 4{,}2$ mm.

Possuindo o comutador poucas lâminas, é conveniente que a escova não curto-circuite mais que duas lâminas ao mesmo tempo e por isso a largura da mesma não deve exceder o valor do passo τ_c, isto é, 0,5 cm. Usam-se escovas de metal carvão, pois estas apresentam pequena queda de tensão no contato com o comutador (1 volt por cada escova). A pressão específica é de 165 g/cm². O coeficiente de atrito é 0,2.

Considerando-se a densidade de corrente, na escova, de 10 amp/cm², a seção da mesma resulta:

$$\frac{I}{10} = \frac{6{,}65}{10} = 0{,}665 \text{ cm}^2$$

Executa-se a escova com as dimensões 0,5 × 1,6 cm; a seção da mesma é

$$S_c = 0{,}5 \cdot 1{,}6 = 0{,}8 \text{ cm}^2$$

As perdas por atrito entre escovas e comutador, conforme parágrafo 32, resultam:

$$W_a = 9{,}81 \cdot p \cdot a \cdot S \cdot v = 9{,}81 \cdot 0{,}165 \cdot 0{,}2 \ (0{,}8 \cdot 2) \ 7 = \sim 3{,}6 \text{ watts.}$$

As perdas por queda de tensão no contato escova-comutador são

$$W_{cv} = \Delta v \cdot I = 1 \cdot 6{,}65 = 6{,}65 \text{ watts}$$

As perdas totais no comutador resultam:

$$W_c = W_a \times W_{cv} = 3{,}6 + 6{,}65 = 10{,}25 \text{ watts}$$

A superfície de irradiação do comutador em dm² é

$$S_c = \pi \cdot D_e \cdot L_c = 3{,}14 \cdot 0{,}38 \cdot 0{,}2 = 0{,}238 \text{ dm}^2$$

Na tabela da Fig. 46, para v = 7 m/seg, corresponde K = 1,43. A elevação de temperatura do comutador, conforme parágrafo 33, resulta:

$$\Delta T = \frac{w_c}{S_c \cdot K} = \frac{10{,}25}{0{,}238 \cdot 1{,}43} = 30^\circ\text{C},$$

valor aceitável.

A tensão entre duas lâminas adjacentes, conforme parágrafo 29, resulta:

$$v = \frac{V}{Z/2p} = \frac{24}{24/2} = 2 \text{ volts}$$

C) *Entreferro* — O comprimento do entreferro, na zona central do pólo, conforme parágrafo 80, resulta:

$$l_e = 1{,}3 \ (0{,}4 \frac{A \cdot \tau}{B_e}) = \frac{1{,}3 \cdot 0{,}4 \cdot 81 \cdot 7{,}85}{4400} = 0{,}072 \text{ cm} = \sim 0{,}7 \text{ mm}$$

D) *Cálculo das dimensões dos pólos e das expansões polares* — Os pólos e a carcaça estatórica são constituídos pela lâmina indicada na Fig. 172. O comprimento do arco da expansão polar corresponde a 0,75 τ.

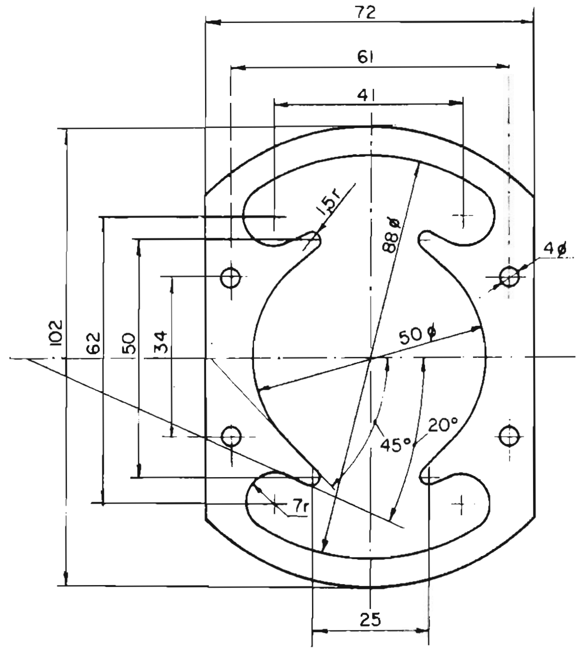


Fig. 172

Sendo o estator laminado, como o rotor, o comprimento da expansão polar é igual ao comprimento magnético do induzido, portanto a seção periférica da expansão resulta:

$$S_p = L \cdot \psi \cdot \tau = 4 \cdot 0{,}75 \cdot 7{,}85 = 23{,}5 \text{ cm}^2$$

Para simplificar o cálculo, considera-se o núcleo e a expansão como sendo um único trecho com seção $S_n = 5 \cdot 4 = 20$ cm² e comprimento $l_n = 1{,}5$ cm.

A seção da carcaça estatórica é

$$0{,}7 \cdot 4 = 2{,}8 \text{ cm}^2$$

O comprimento do circuito magnético da carcaça estatórica é

$$\frac{\pi \cdot (8{,}8 + 0{,}7)}{4} = \sim 7{,}5 \text{ cm}$$

E) *Cálculo da seção e comprimento da carcaça rotórica* — Da Fig. 170 resulta que a espessura da carcaça rotórica é 0,65 cm. A seção da carcaça rotórica $é = 0{,}65 \cdot 4 = 2{,}6 \text{ cm}^2$

O comprimento de dita carcaça resulta

$$= \frac{(1{,}4 + 0{,}65)\ \pi}{2} = 3{,}22 \text{ cm}$$

F) *Cálculo da seção do entreferro e dos dentes rotóricos* — Número dos dentes embaixo de um pólo $= \frac{12}{2} = 6$

Número dos dentes embaixo de uma expansão polar $= 6 \cdot 0{,}75 = 4{,}5$
Seção periférica dos dentes embaixo de uma expansão polar:

$$S'_d = 1{,}1 \cdot 4 \cdot 4{,}5 = \sim 20 \text{ cm}^2$$

$$\text{Seção do entreferro} = \frac{S_p + S'_d}{2} = \frac{23{,}5 + 20}{2} = \sim 21{,}8 \text{ cm}^2$$

A seção média dos dentes resulta:

$$S_d = 0{,}4 \cdot 4 \cdot 4{,}5 = 7{,}2 \text{ cm}^2$$

G) *Cálculo do fluxo e das ampère-espiras magnetizantes* — No item A foi visto que a queda da tensão ôhmica no induzido resulta $R_i = 4{,}15$ volts, que corresponde a aproximadamente 17% do valor da tensão de alimentação. O valor elevado desta porcentagem é devido ao fato de ter sido escolhido um elevado valor da densidade de corrente (6,5 amp/mm²). No item B foi visto ser de 1 volt a queda de tensão existente no contato entre escovas e comutador.

A queda de tensão no circuito de excitação em série pode ser considerada igual à do induzido, isto é, de 17% do valor da tensão de alimentação, ou seja, 4,15 volts.

O valor da f.c.e.m. que o motor deve gerar resulta:

$$E = 24 - (4{,}15 + 1 + 4{,}15) = 14{,}7 = \sim 15 \text{ volts.}$$

O fluxo é obtido por:

$$\phi = \frac{10^8 \cdot E \cdot 60}{n \cdot N_c} = \frac{10^8 \cdot 15 \cdot 60}{3500 \cdot 384} = \sim 67\,000 \text{ maxwell}$$

Agrupando-se os valores até agora calculados na tabela da Fig. 173 e considerando-se o coeficiente de dispersão K = 1,1, obtém-se:

Trecho	*Fluxo*	*Seção*	*Indução*	*A.e.cm*	*Comprimento*	$A_c . l$
Carcaça	36850	2,8	13160	11,0	7,5	82
Pólo	73700	20,0	3685	0,67	3	2
Entreferro	67000	21,8	3080	2464,0	0,14	345
Dentes	67000	7,2	9300	3,7	2,2	8
Armadura	33500	2,6	12900	10,0	3,22	32
					Total	469

Fig. 173

As ampère-espiras por pólo, necessárias à geração do fluxo, resultam

$$\frac{469}{2} = \sim 235$$

Considerando-se o deslocamento das escovas de uma lâmina em sentido contrário ao da rotação, as ampère-espiras de reação contrária, por pólo, conforme parágrafo 50, resultam:

$$X_c = 2 \cdot b \cdot I_a \cdot N_z = 2 \cdot 1 \cdot 3{,}32 \ (\frac{192}{24}) = 53$$

As ampère-espiras transversais resultam:

$$X_t = (Z_p - 2b) \ N_z \cdot I_a = (\frac{24}{2} - 2) \ \frac{192}{24} \cdot 3{,}32 = 265$$

As ampère-espiras necessárias para compensar a reação transversal correspondem a 30% do valor anteriormente calculado, isto é:

$$NI_t = 265 \cdot 0{,}30 = \sim 80$$

As ampère-espiras por pólo resultam:

$$A_e = 235 + 53 + 80 = 368$$

Sendo a excitação em série, o número das espiras por pólo deve ser:

$$N_p = \frac{A_e}{I} = \frac{368}{6,65} = \sim 56 \text{ espiras}$$

Fixando-se a densidade de corrente $\delta = 6,4$ amp/mm², a seção do condutor resulta:

$$S = \frac{6,65}{6,4} = 1,04 \text{ mm}^2.$$ Usa-se fio n.º 17 cuja seção é de 1,04 mm².

H) *Cálculo da perda por efeito joule no circuito de excitação* — A bobina de excitação, quando pronta, possui a forma e dimensões indicadas na Fig. 174. O comprimento da espira média resulta:

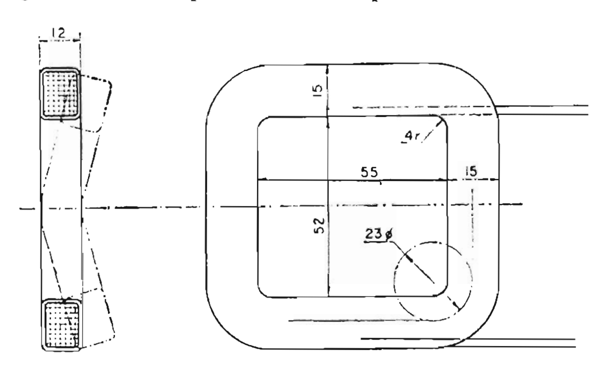


Fig. 174

$$l_m = 2 \cdot 47 + 2 \cdot 44 + \pi \cdot 23 = 254,5 \text{ mm}$$

O comprimento total do fio nas duas bobinas é

$$l = 112 \cdot 254,5 = 28\,504 \text{ mm} = 28,5 \text{ m}$$

Resistência do circuito de excitação:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} = \frac{0,0216 \cdot 28,5}{1,04} = 0,592 \ \Omega$$

Queda de tensão no circuito de excitação:

$$\Delta v_{ex} = R \cdot I = 0,592 \cdot 6,65 = 3,94 \text{ volts}$$

Perda por efeito joule no indutor:

$$w_{ex} = R \cdot I^2 = 0,592 \cdot 6,65^2 = 26,2 \text{ watts}$$

I) *Perdas e aquecimento do induzido* – Freqüência de variação de fluxo no rotor:

$$f = \frac{p \cdot n}{60} = \frac{1 \cdot 3500}{60} = 58,5 = \sim 60 \text{ Hz}$$

Volume da carcaça rotórica

$$= \frac{\pi \ (2,7^2 - 1,4^2)}{4} - 4 = 16,52 \text{ cm}^3$$

Peso da carcaça rotórica = $16,52 \cdot 7,8 = 128$ g = 0,128 kg.

Volume dos dentes = $0,4 \cdot 1,17 \cdot 4 \cdot 12 = 22,5$ cm³

Peso dos dentes = $22,5 \cdot 7,8 = 167$ g = ~ 0,18 kg.

Para a freqüência de 60 Hz, a tabela da Fig. 81 ou o diagrama da Fig. 82 fornece as perdas específicas, que resultam:

Na carcaça, onde

$$B = 13\,160; \ W_f = 7,8 \ \text{w/kg}$$

Nos dentes, onde

$$B = 9300; \ W_f = 4,1 \ \text{w/kg}$$

A perda na carcaça é

$$0,128 \cdot 7,8 \cdot 1,25 = 1,25 \text{ watts}$$

A perda nos dentes é

$$0,18 \cdot 4,1 \cdot 1,25 = 0,92 \text{ watts}$$

Perdas totais no ferro do induzido = 2,17 watts

Do item A resulta que a perda por efeito joule no induzido é de 27,64 watts. Assim sendo, as perdas totais no induzido resultam

$$27,64 + 2,17 = \sim 29,8 \text{ watts.}$$

Considerando-se como superfície de irradiação a cilíndrica e as duas frontais, a área total irradiante resulta:

Superfície cilíndrica = $\pi \cdot D \cdot L = 3,14 \cdot 5 \cdot 3,4 = 69$ cm² = 0,0069 m²

$$\text{Superfícies laterais} = \frac{\pi D^2}{4} 2 = \frac{3,14 \cdot 5^2}{4} 2 = 39 \text{ cm}^2 = 0,0039 \text{ m}^2$$

Superfície total de irradiação = 0,0108 m²

$$W/m^2 = \frac{W}{S_t} = \frac{29,8}{0,0108} = 2760$$

Sendo a velocidade periférica do induzido

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}05 \cdot 3500}{60} = 9{,}2 \text{ m/seg}$$

Da Fig. 97 resulta, para esta velocidade, que K = 54, de onde

$$T = \frac{2760}{54} = 51^\circ C \text{ aproximadamente.}$$

Esta elevação de temperatura é aceitável, pois no induzido a elevação máxima é de 55°C.

J) *Perdas por atrito e ventilação, adicionais e superficiais* — Nos pequenos motores, as perdas por atrito, ventilação e adicionais são avaliadas, conforme parágrafo 46, tomando-se por base a potência interna do motor W_i e a velocidade periférica do induzido. Sendo v = 3,2 m/seg, ditas perdas resultam $0{,}002 \cdot 160 = 0{,}32$ watts.

As perdas adicionais podem ser consideradas iguais a 1% do valor da potência interna do motor ou seja $0{,}01 \cdot W_i = 0{,}01 \cdot 160 = 1{,}6$ watts.

As perdas superficiais, conforme parágrafo 35, podem ser consideradas iguais a 1/3 do valor da perda nos dentes, isto é, 0,92/3 = 0,3 watts.

K) *Rendimento* — As perdas globais do motor são:

1 — No induzido, ferro e cobre (item I)	29,80 watts
2 — No comutador, atrito e queda de tensão (item B) ..	10,25 watts
3 — No circuito de excitação (item H)	26,20 watts
4 — Por atrito e ventilação	0,32 watts
5 — Adicionais	1,60 watts
6 — Superficiais	0,30 watts
Perdas totais =	68,47 watts

Considerando-se $w_p = \sim 70$ watts, o rendimento do motor resulta:

$$\mu = \frac{W}{W + W_p} = \frac{80}{80 + 70} = \sim 0{,}54$$

No início do cálculo do motor, o rendimento foi considerado igual a **0,5.**

A irradiação para o ar das calorias produzidas pelas perdas é feita por meio de um pequeno ventilador, preso ao próprio eixo do motor.

N.B. — O número das espiras de cada bobina de excitação deverá ser ajustado por meio de ensaio real, executado com o protótipo do motor montado no eletroventilador. Estas espiras serão alteradas até que o rotor alcance a velocidade de 3500 r.p.m, pois nestas condições o motor produz a potência de 80 watts.

CAPÍTULO IX

104 — Sentido de rotação das máquinas de corrente contínua

Os dínamos auto-excitados possuem um sentido fixo de rotação, pois a rotação deve processar-se de forma que nas escovas se gere uma diferença de potencial com polaridade apropriada. Esta polaridade deve ser tal que possa produzir no enrolamento indutor uma corrente capaz de reforçar o magnetismo residual da máquina. Conforme foi visto no parágrafo 36, a auto-excitação somente é possível quando o circuito magnético da máquina consegue reter uma certa quantidade de magnetização, chamada de magnetismo residual.

Inverter a rotação de um gerador auto-excitado tem como conseqüência a inversão da diferença de potencial nas escovas e portanto da corrente no circuito de excitação. A inversão da corrente no circuito de excitação provoca a destruição do magnetismo residual e a máquina não poderá mais excitar-se, mesmo quando voltar a girar no sentido certo. Uma vez desmagnetizada a máquina, para que possa voltar a funcionar, será preciso criar novamente o magnetismo residual, o que é feito por meio de uma fonte externa de energia, lançando-se uma corrente, no sentido correto, através do circuito de excitação.

É compreensível, portanto, que, desejando-se modificar o sentido de rotação de um dínamo, é preciso inverter a ligação do circuito de excitação com as escovas.

É importante observar-se o que ocorre quando uma máquina de corrente contínua deixa de funcionar como gerador e passa a funcionar como motor. No parágrafo 84 foi visto que, mantendo-se invariado o campo e lançando-se no induzido uma corrente, com o mesmo sentido da produzida pela máquina quando em funcionamento como gerador, esta passará a funcionar como motor girando em sentido contrário ao do possuído no funcionamento como gerador.

Para que a máquina, funcionando como motor, tenha o mesmo sentido de rotação que possuía quando em funcionamento como gerador, é necessário inverter a corrente no induzido, mantendo inalterada a corrente do campo ou vice-versa, manter fixa a corrente no induzido e inverter a do campo indutor.

A seguir será examinado, para os diferentes tipos de máquinas de corrente contínua, o que ocorre na passagem do funcionamento de gerador para motor, qual a influência da inversão da polaridade de alimentação do motor e por fim como operar para inverter a rotação de um motor de corrente contínua.

a) *Máquina de excitação separada* — Alimentando-se a máquina com a mesma polaridade possuída no funcionamento como gerador, conforme Fig. 175, inverte-se o sentido da corrente no induzido, ficando invariado o da corrente no indutor.

Nestas condições o sentido de rotação do motor é o mesmo que a máquina possui como gerador. Esta é uma qualidade importante da máquina de excitação separada, conforme será observado mais tarde.

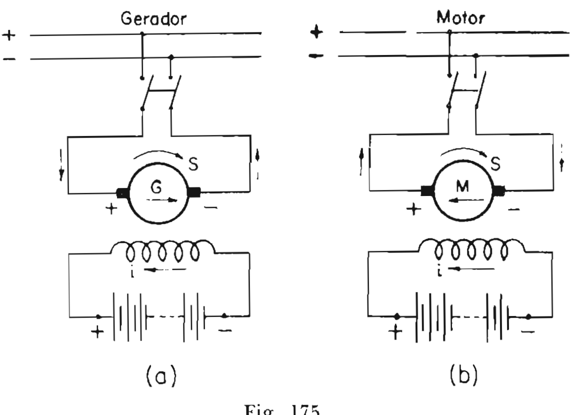


Fig. 175

A inversão da polaridade de alimentação de um motor com excitação separada provoca, conforme Fig. 176, a inversão da corrente no induzido e, por conseguinte, a inversão do sentido de rotação do motor.

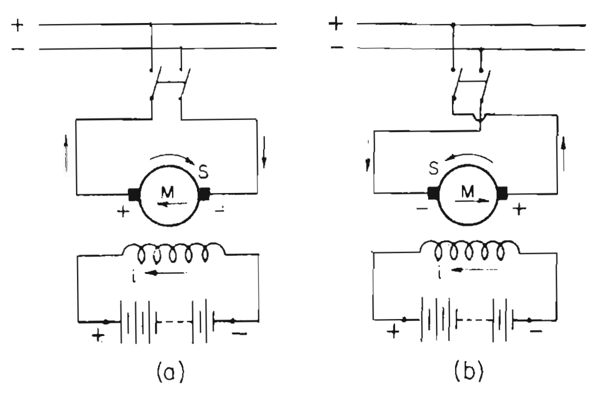


Fig. 176

Outro processo usado para inverter a rotação de um motor com excitação separada consiste em inverter o sentido da corrente no circuito de excitação, conforme Fig. 177.

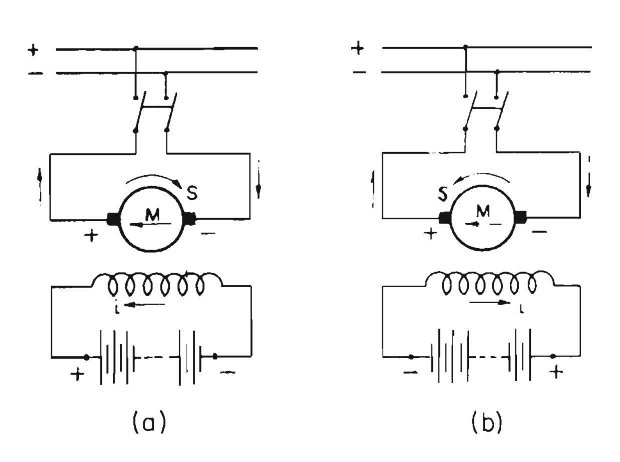


Fig. 177

Processando-se a inversão da corrente, tanto no indutor como no induzido, o motor continua rodando no mesmo sentido.

b) *Máquina de excitação em derivação* — Alimentando-se a máquina de excitação em derivação com a mesma polaridade possuída no funcionamento como gerador, conforme Fig. 178, inverte-se o sentido da corrente no induzido, ficando invariado o da corrente do indutor.

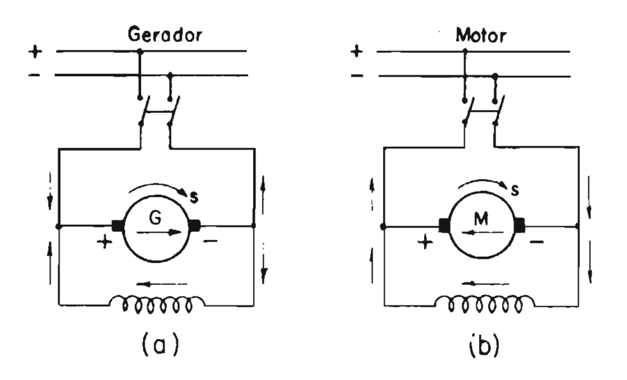


Fig. 178

Nestas condições o sentido de rotação do motor é o mesmo que a máquina possuía no funcionamento como gerador.

A inversão da polaridade de alimentação de um motor com excitação em derivação provoca, conforme Fig. 179, a inversão da corrente

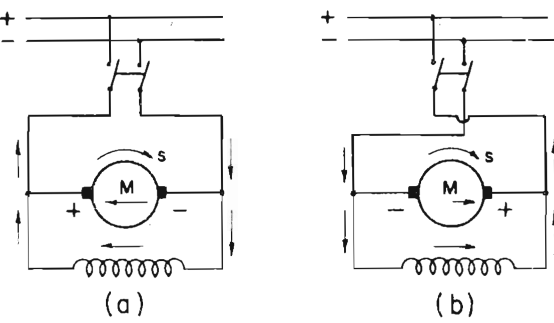


Fig. 179

no induzido e no indutor e por conseguinte o sentido de rotação do motor permanece inalterado.

A inversão do sentido de rotação de um motor com excitação em derivação obtém-se invertendo-se a ligação do circuito de excitação com respeito ao induzido, conforme Fig. 180.

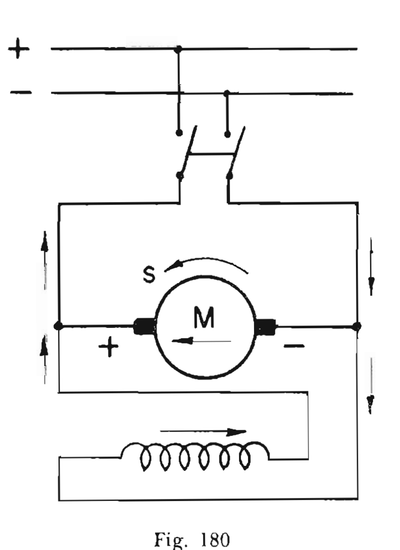


Fig. 180

c) *Máquinas de excitação em série* — Alimentando-se um motor de excitação em série com a mesma polaridade possuída no funcionamento como gerador, conforme Fig. 181, inverte-se a corrente, simultaneamente, no induzido e no indutor.

Nestas condições, o sentido de rotação do motor é contrário ao do possuído pela máquina quando em funcionamento como gerador.

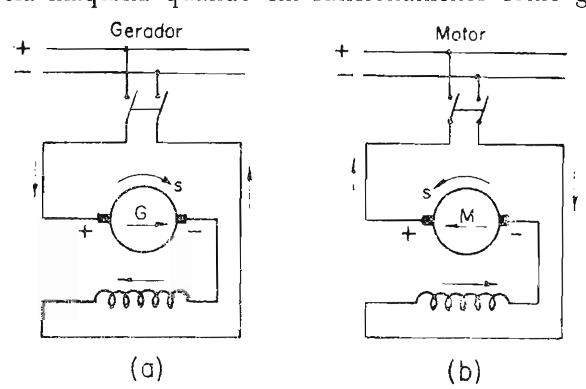


Fig. 181

Invertendo-se a polaridade de alimentação de um motor com excitação em série, inverte-se simultaneamente o sentido da corrente no indutor e no induzido, conforme Fig. 182, ficando inalterado o sentido de rotação do motor.

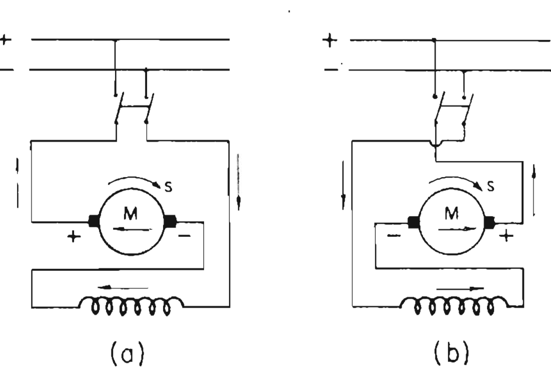


Fig. 182

A inversão do sentido de rotação do motor com excitação em série da Fig. 182 (a) obtém-se invertendo-se a ligação do circuito indutor, conforme Fig. 183 (a), ou invertendo-se a ligação do induzido, conforme Fig. 183 (b).

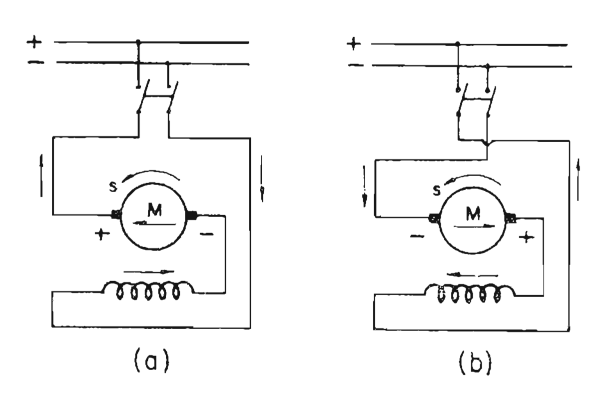


Fig. 183

d) *Máquina com excitação composta* — Na máquina de excitação composta, em geral, o enrolamento de excitação em derivação prevalece sobre o de excitação em série. Por esta razão, alimentando-se o motor com a mesma polaridade possuída no funcionamento como gerador, o mesmo gira no mesmo sentido que no funcionamento como gerador.

Invertendo-se porém a corrente no circuito de excitação em série, conforme Fig. 184 (b), o motor terá fluxo diferencial se o gerador era de fluxo adicional e vice-versa.

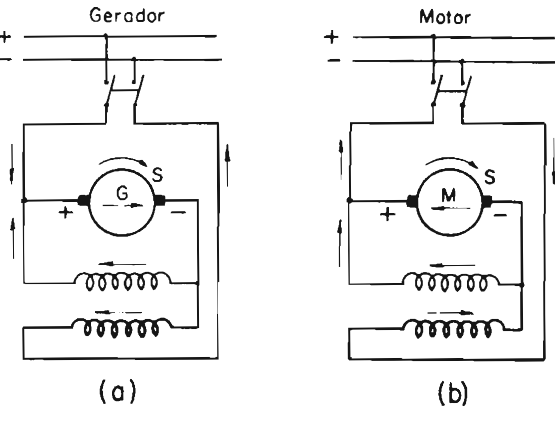


Fig. 184

A inversão da polaridade de alimentação de um motor com excitação composta não altera o sentido de rotação da máquina, pois a mesma provoca a inversão simultânea da corrente no induzido e no indutor, conforme Fig. 185.

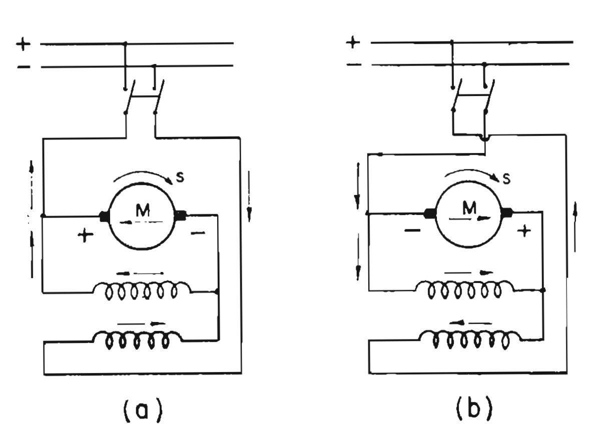


Fig. 185

Desejando-se inverter a rotação, por exemplo, do motor indicado na Fig. 185 (a), sem alterar as características de funcionamento do mesmo, é preciso inverter a corrente no induzido, sem alterar o sentido da corrente nos dois enrolamentos indutores, conforme Fig. 186.

105 — Freio elétrico com recuperação de energia

No parágrafo precedente foi observado que, com exceção do gerador de excitação em série, todos os geradores de corrente contínua podem passar a funcionar como motores, mantendo o mesmo sentido de rotação e a mesma polaridade.

Assim sendo, o regime de funcionamento de uma destas máquinas, quando ligada a uma linha de tensão constante, é definido pelo valor da f.e.m. E da máquina em relação ao valor da tensão da linha de alimentação.

Se E for maior que V, a máquina funcionará como gerador. Pelo contrário, se E for menor que V, a máquina funcionará como motor.

Fig. 186

A variação de E é obtida através da variação da excitação ou da velocidade da máquina. Examine-se, por exemplo, o que ocorre com uma locomotiva elétrica que aciona um trem. Na subida, por efeito do elevado conjugado resistente, o número de rotações da máquina é baixo, portanto $E < V$. O funcionamento é de motor. Num declive, a própria energia cinética do trem faz com que este aumente sua velocidade.

O conjugado resistente diminui e a velocidade aumenta sucessivamente de n'_3 para n'_2; n'_1; n'_0 conforme Fig. 187.

Ao alcançar a velocidade n_0 ocorre que $E = V$, isto é, a máquina está em paralelo com a linha sem absorver nem fornecer potência.

Se a velocidade da máquina aumentar, por efeito da energia cinética do trem,

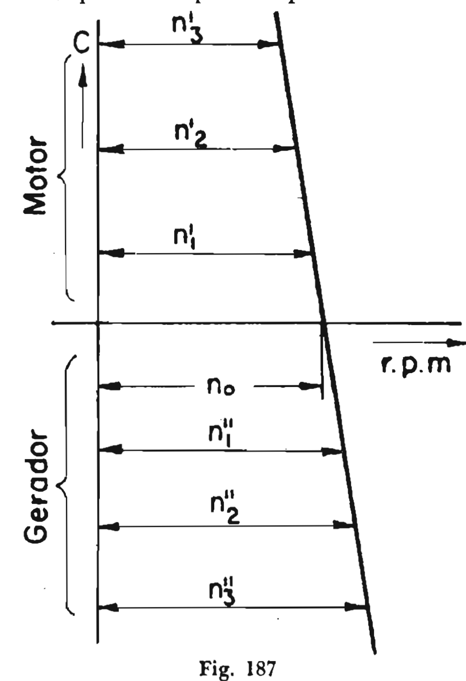


Fig. 187

ocorre que sendo $E > V$, esta passa a funcionar como gerador, fornecendo energia elétrica para a linha. Tendo-se invertido a direção da corrente no induzido, inverte-se também o sentido do conjugado, que por $n < n_0$ é motor e por $n > n_0$ é resistente.

Nas condições expostas o conjunto transforma a energia cinética do trem em energia elétrica, a qual é fornecida para a linha de alimentação. A ação do conjugado resistente tem como conseqüência uma ação freiante, limitadora da velocidade do trem. Esta é a razão de se chamar o processo descrito de freio com recuperação da energia.

Evidentemente, desejando-se aumentar o efeito freiante da máquina, deverá ser aumentado o valor da f.e.m. E, o que é feito através de aumento da excitação da mesma.

O freio elétrico com recuperação de energia pode unicamente limitar a velocidade do trem, sem porém conseguir freá-lo totalmente, pois abaixo de determinada velocidade a ação freiante anula-se.

A corrente que a máquina fornece para a linha, quando em funcionamento como gerador, é $I = (E - V)/R_i$, onde R_i é o valor da resistência interna da máquina. A potência fornecida é $W = EI - R_iI^2$ e o valor do conjugado freiante é $C = 0{,}975 \dfrac{W}{n}$ expresso em kgm, se W for expresso em watts e n em r.p.m.

Um fato contrário ao exposto verifica-se quando deixa de funcionar o motor de acionamento de um dínamo que trabalha em paralelo com uma linha, mantida com tensão constante por outros geradores.

No funcionamento como dínamo, supõe-se que a máquina é mantida, conforme Fig. 187, em um regime de rotações $n''_2 > n_0$, por meio de um motor térmico. Enquanto n''_2 for maior que n_0, a máquina funciona como gerador, fornecendo energia para a linha.

Se o motor térmico, que aciona o gerador, deixar de funcionar, a velocidade do conjunto diminui até que, resultando inferior a n_0, a máquina passa a funcionar como motor, arrastando o motor térmico defeituoso na rotação.

106 — Impossibilidade da máquina, com excitação em série, frear eletricamente com recuperação da energia

Os fatos expostos no parágrafo precedente aplicam-se às máquinas de fluxo magnético constante, nas quais a variação da f.e.m. é diretamente proporcional à velocidade da mesma. Não se verificam, portanto, nas máquinas de excitação em série.

Nos motores de excitação em série, aumentando a velocidade diminui a corrente e, por conseguinte, o fluxo magnético. Nestas condições

nunca a f.e.m. E poderá adquirir valores superiores ao da tensão V da linha. Por esta razão o motor de excitação em série não pode atuar como freio, efetuando a recuperação da energia.

Este fato é comprovado pela própria característica externa do motor com excitação em série, indicada na Fig. 188.

Esta característica evidencia o fato de que aumentando-se a velocidade da máquina, o conjugado motor diminui, tendendo seu valor a zero, mas sem inverter seu sinal, isto é, sem tornar-se conjugado resistente.

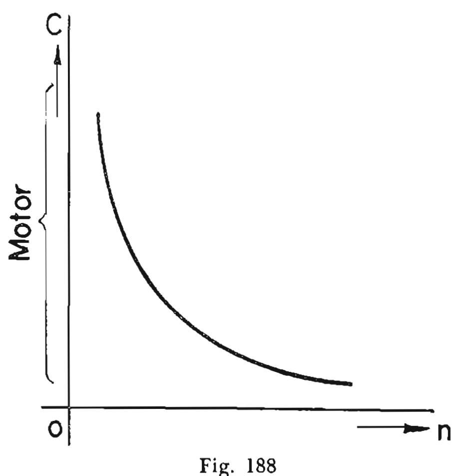


Fig. 188

O motor com excitação em série pode contudo ser utilizado como freio, bastando para tanto desligá-lo da linha de alimentação e conetá-lo a resistências apropriadas, de forma que possa trabalhar como dínamo. O processo descrito é utilizado na tração elétrica (trens, bondes, *trolley-buses*, etc.), onde se empregam motores de excitação em série, sendo chamado de freio dinâmico ou freio sobre resistências.

Também o freio dinâmico atua como limitador de velocidade do veículo, não conseguindo parar totalmente o mesmo, pelo fato de que abaixo de determinada velocidade a ação freiante extingue-se.

107 — Freio com contracorrente

Consegue-se uma violenta ação freiante, invertendo-se a corrente no induzido do motor, obrigando-o a girar instantaneamente, em sentido contrário.

Evidentemente com a manobra acima descrita o motor pode ficar destruído pelas violentas solicitações mecânicas e pelo valor excessivo da corrente absorvida pelo motor. Nas condições descritas, a f.e.m. E e a tensão V atuam no mesmo sentido, somando-se seus efeitos.

Pelo exposto, o freio com contracorrente somente é empregado em casos que justificam o risco da destruição do motor.

108 — Necessidade de agrupamento dos geradores elétricos

Nas usinas elétricas não é conveniente usar um único gerador, de elevada potência, capaz de fornecer sozinho toda a energia elétrica necessária para abastecer as linhas utilizadoras. As razões básicas, que impelem a usar mais de um gerador, são três, isto é:

1.º — Se houver defeito no único gerador, a usina fica impossibilitada de operar, mesmo com carga reduzida.
2.º — Nos períodos de pequena demanda, o único gerador, de grande potência, trabalha com carga reduzida e por conseguinte com baixo rendimento.
3.º — No caso de existir um gerador de reserva, para substituir o gerador principal quando estiver com defeito, este deve ser também de grande potência, pois em caso de necessidade deve poder alimentar sozinho todas as linhas utilizadoras.

Para evitar os inconvenientes mencionados, as usinas, em lugar de um único gerador de grande potência, usam vários geradores de pequena potência, os quais serão agrupados entre si quando a carga o exigir e desconetados quando não forem mais necessários. Um defeito, que impede a um destes geradores de funcionar, não constitui grande problema, pois exclui-se o gerador defeituoso do circuito e coneta-se em seu lugar um de reserva, sem que as linhas utilizadoras sofram a mínima perturbação. O sistema que utiliza vários geradores de pequena potência, além das vantagens técnicas mencionadas, é também economicamente conveniente, pois a reserva é constituída por um ou dois geradores de pequena potência, cujo custo representa uma fração do custo de um grande gerador que possa operar sozinho.

O número de geradores ligados deve variar conforme as necessidades do serviço, de forma que todos os geradores possam sempre trabalhar com carga normal, apresentando as melhores condições de rendimento.

Pelo exposto, compreende-se que nas usinas com vários geradores apresenta-se a necessidade de agrupá-los, quando por necessidade de serviço devem ser somadas as potências dos mesmos.

A quase totalidade das usinas destina-se a alimentar linhas com tensão constante e emprega portanto dínamos com excitação independente, em derivação ou composta, os quais devem ser agrupados em paralelo entre si, sendo a tensão da linha utilizadora comum para todos.

Nas antigas e raras usinas destinadas a alimentar circuitos de iluminação em série, com corrente constante, eram usados dínamos com excitação em série. Tais dínamos deviam ser agrupados em série, pois a corrente da linha utilizadora era comum para todos os geradores agrupados.

Qualquer que seja o tipo de agrupamento a ser executado, a manobra deve ser feita de forma a não perturbar as condições de funcionamento das linhas utilizadoras.

109 — Agrupamento em paralelo das máquinas com excitação em derivação e das com excitação separada

Para que dois ou mais dínamos possam ser agrupados em paralelo é necessário que os mesmos possuam a mesma tensão. Se os geradores agrupados em paralelo possuem a mesma potência, os mesmos fornece-

rão a mesma corrente. Se, pelo contrário, os geradores são de potência diferente, fornecerão correntes proporcionais às respectivas potências.

Os bornes dos geradores estão conetados a duas barras coletoras, chamadas também de barras "ônibus", as quais alimentam as linhas utilizadoras. A Fig. 189 representa o esquema das conexões relativo ao

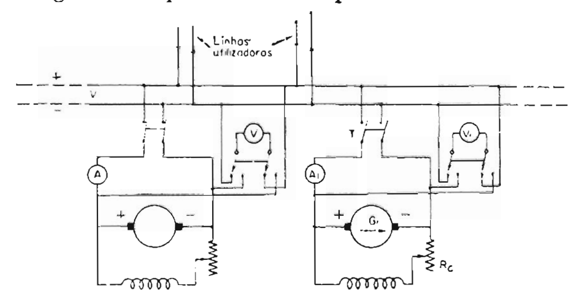


Fig. 189

agrupamento do gerador G_1 com as barras, mantidas com tensão constante por outros geradores. No circuito de cada dínamo está inserido um amperímetro que indica a corrente fornecida a um interruptor T destinado a efetuar a manobra. O voltímetro V, provido de desviador, permite medir a tensão do dínamo e a das barras.

A manobra destinada a ligar o dínamo G_1 com a linha efetua-se obedecendo à seqüência transcrita a seguir: põe-se o dínamo em funcionamento, com o interruptor T aberto; aumenta-se sua velocidade até que esta alcance seu valor nominal; regula-se a excitação, por meio do reostato R_c, até que a tensão nos bornes do dínamo resulte igual à das barras; fecha-se o interruptor T e o dínamo G_1 está em paralelo com os demais que alimentam as barras. O amperímetro A_1 não indica corrente alguma pois, nestas condições, verificando-se que $E_1 = V$, resulta $I_1 = O$.

Para que o dínamo G_1 forneça corrente é preciso aumentar sua excitação de forma que a f.e.m. E_1 resulte maior que V. O valor da corrente fornecida pela máquina é dado por:

$$I_1 = \frac{E_1 - V}{R_i}$$

onde R_i representa a resistência interna do dínamo.

Durante a manobra de ajuste da carga, no gerador G_1 e nos demais, o regime de funcionamento das linhas utilizadoras deve ficar inalterado, o que é obtido por meio de manobras simultâneas visando ao aumento da corrente I_1 do gerador G_1 e a diminuição proporcional das correntes fornecidas pelos demais geradores. A diminuição da corrente das demais máquinas é obtida diminuindo-se a excitação das mesmas.

Verificando-se uma sensível diminuição da demanda nas linhas utilizadoras, um dos geradores agrupados é desconetado das barras. A manobra necessária para desconetar um dos geradores consiste em diminuir gradativamente a corrente por este fornecida, até que seu amperímetro marque zero. Simultaneamente deve-se aumentar a corrente nas demais máquinas a fim de que o regime de funcionamento das linhas utilizadoras não fique alterado. Uma vez efetuada a transferência de toda a carga do gerador a ser desligado para os demais geradores, é possível abrir seu interruptor de comando.

Para que o funcionamento de vários geradores agrupados em paralelo seja estável é necessário que os mesmos possuam tensão constante. Para que esta condição seja alcançada é preciso que a velocidade dos geradores não varie ao variar a carga. Por esta razão os mesmos são acionados por motores providos de reguladores automáticos de velocidade.

110 — Estabilidade do funcionamento em paralelo das máquinas com excitação em derivação e excitação separada

Os dínamos com excitação em derivação ou com excitação separada possuem funcionamento estável, quando agrupados em paralelo com linhas de tensão constante. O funcionamento é considerado estável pelo fato das perturbações produzidas pelas variações de velocidade ou de excitação numa das máquinas agrupadas não alterarem sensivelmente o regime de funcionamento existente.

Suponha-se que o gerador G_1 da Fig. 189 possua a característica externa V da Fig. 190 e que as barras possuam a tensão constante V.

O ponto P de cruzamento da característica externa do dínamo G_1 e a linha AA, da ordenada V, define o valor da corrente I, fornecida por este, com a tensão V.

Se por uma razão qualquer, a excitação ou a velocidade do gerador G_1 aumenta, a característica externa do mesmo resulta V_1, mais alta que V. A corrente fornecida pelo gerador do valor inicial I passa ao valor I_1. Além desta pequena variação da corrente, nenhum outro fenômeno perturbador ocorre.

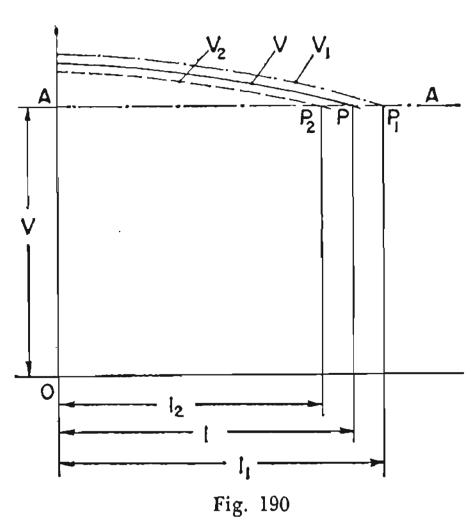


Fig. 190

Se a velocidade ou a excitação da máquina, em lugar de aumentar, diminui, a característica externa V_2 resulta mais baixa que V e o valor da corrente fornecida por esta diminui do valor I para o I_2.

Verificando-se os inevitáveis acidentes de funcionamento, antes descritos, além da variação da corrente, entre pequenos limites, nenhum problema sério surgirá. Por isso, o funcionamento de geradores de tensão constante, agrupados em paralelo, é considerado estável.

Se a diminuição da velocidade ou da excitação do gerador G_1 for de tal ordem que a f.e.m. E deste resultar inferior a V, inverte-se o sentido da corrente no induzido e a máquina passará a trabalhar como motor, girando no mesmo sentido, o que não representa problema grave.

Se os geradores agrupados em paralelo forem dois, o regime de funcionamento dos mesmos é o representado pelo diagrama da Fig. 191.

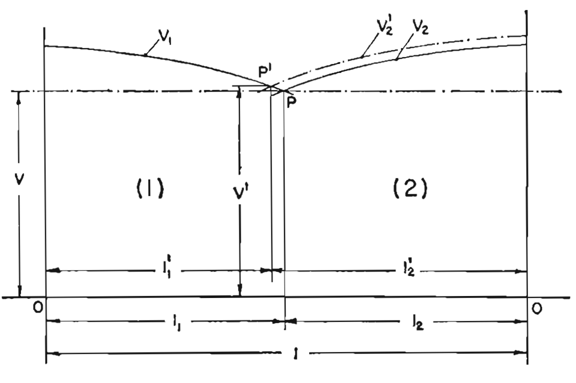


Fig. 191

As duas características externas, traçadas em sentido contrário, expressam o fato da corrente total I fornecida ao circuito utilizador ser a soma das correntes I_1 e I_2, fornecidas respectivamente pelos dois dínamos agrupados em paralelo.

O ponto de contato P das duas características define os valores I_1, I_2 das correntes e o V da tensão, comuns aos dois dínamos.

Se a velocidade ou a excitação da máquina (2) aumentar, a característica externa V'_2 da mesma resultará mais alta que a V_2. O ponto de interseção P' desloca-se ao longo da característica V_1. Este ponto define a corrente I'_2, que resulta levemente maior que I_2 e I'_1, que é levemente menor que I_1. É evidente que a perturbação do funcionamento de uma das máquinas foi acompanhada por uma ação auto-reguladora, na outra, de forma que a corrente I, no circuito utilizador, não sofre variação apreciável. Do exposto, conclui-se que o funcionamento de dois dínamos com tensão constante, agrupados em paralelo, é estável.

Na realidade a perturbação do funcionamento provocou o deslocamento do ponto de interseção de P para P', com a conseqüente variação da tensão do valor V para o valor $V' > V$. O acréscimo da tensão

nos bornes do circuito utilizador provoca um pequeno aumento da corrente no mesmo. Tanto o acréscimo da tensão como o da corrente são de pequeno vulto e podem ser desprezados.

111 — Impossibilidade de agrupar em paralelo máquinas com excitação em série

O agrupamento em paralelo dos dínamos excitados em série não é estável, pois se uma das máquinas diminuir sua rotação, diminuirá sua tensão e por conseguinte a corrente fornecida. A diminuição da corrente provoca diminuição do fluxo e portanto ulterior diminuição da tensão. Em pouco tempo a máquina deixará de produzir tensão e corrente, isto é, deixará de produzir sua contribuição na geração de energia necessária às linhas utilizadoras.

A outra máquina, para compensar a diminuição da corrente que ocorre na primeira, aumenta a corrente fornecida, aumentando a corrente e a tensão.

Em conclusão, quando se verifica uma perturbação do tipo antes mencionado, o desequilíbrio tende a acentuar-se nas duas máquinas, de forma que uma perde totalmente sua carga, enquanto a outra passa a produzir a carga total necessária ao circuito utilizador.

Pelo exposto, conclui-se que o funcionamento em paralelo de dínamos excitados em série não é estável.

112 — Disposição prática para o agrupamento em paralelo dos dínamos com excitação composta

Nos dínamos de excitação composta, a presença do campo-série, pelas razões expostas no parágrafo precedente, torna instável o agrupamento em paralelo dos mesmos. Tal agrupamento, entretanto, pode ser tornado estável por meio de um artifício de fácil realização, que consiste em ligar em paralelo os circuitos de excitação em série das máquinas que devem ser agrupadas.

Executando-se o agrupamento conforme indica a Fig. 192, ocorre que a diferença de potencial existente entre os pontos A e B é comum para os dois enrolamentos dos campos-série das máquinas.

Qualquer aumento ou diminuição de corrente numa das máquinas afeta os dois enrolamentos de excitação em série, de forma que não há possibilidade de uma máquina enfraquecer sua excitação enquanto a da outra máquina aumenta. Com as ligações indicadas na Fig. 192 as excitações das duas máquinas aumentam ou diminuem simultaneamente, tornando assim estável seu funcionamento em paralelo.

A realização prática das ligações indicadas no esquema da Fig. 192 é feita conforme indica a Fig. 193, por meio da "conexão de equilíbrio".

Os princípios P_1 e P_2 dos dois campos-série são agrupados pela conexão de equilíbrio, enquanto os fins F_1 e F_2 são agrupados entre si através da barra coletora negativa. Eletricamente nenhuma diferença existe entre o esquema da Fig. 192 e o da Fig. 193.

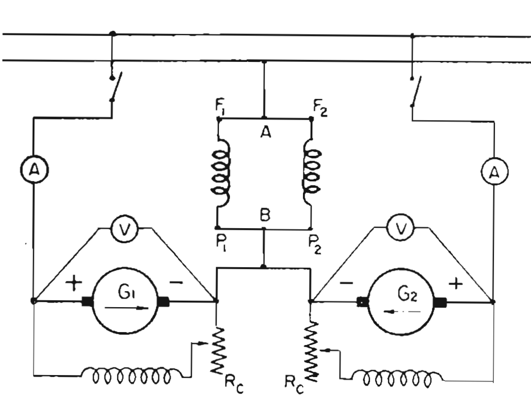


Fig. 192

A conexão de equilíbrio, além de assegurar a estabilidade do funcionamento em paralelo dos geradores, evita sérios inconvenientes, provocados pela inversão da corrente no circuito de excitação em série da máquina que acidentalmente passar a funcionar como motor.

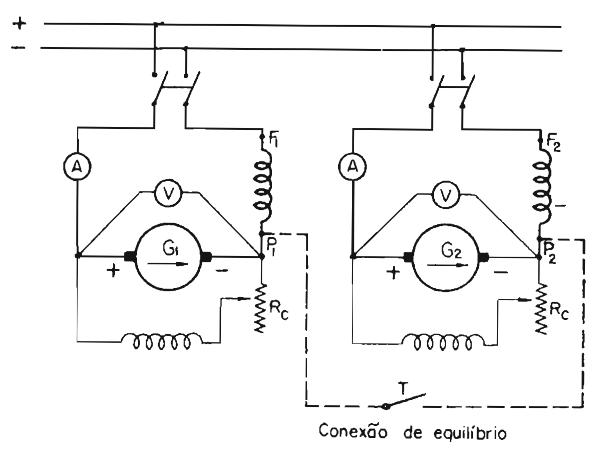


Fig. 193

Se uma das máquinas, por causa de defeito do motor de acionamento, reduz sua velocidade, até que $E < V$, a mesma passará a funcionar como motor absorvendo corrente da linha. Se não existisse a conexão de equilíbrio, verificar-se-ia a inversão do sentido da corrente no enrolamento de excitação em série da mesma. A máquina passaria a funcionar como motor de fluxo diferencial. O fluxo resultante, de baixa intensidade, obrigaria o motor a girar com velocidade elevada. Por outro lado, toda a carga do circuito utilizador seria transferida para o outro dínamo, o qual passaria a trabalhar em regime de sobrecarga.

A presença da "conexão de equilíbrio" evita os inconvenientes mencionados, pois, impedindo a inversão do sentido da corrente no circuito de excitação em série, impede o enfraquecimento do fluxo na máquina que acidentalmente diminui sua velocidade. Nestas condições, o comportamento da máquina é equivalente ao do dínamo com excitação em derivação.

113 — Agrupamento em série de máquinas com excitação em série

Este tipo de agrupamento não encontra aplicação prática, pois os circuitos de corrente constante, como por exemplo os de iluminação com lâmpadas em série, são alimentados com corrente alternada por meio de transformadores especiais de corrente constante.

Pode entretanto ocorrer que um circuito de corrente constante esteja sujeito a aumentos acentuados do valor de sua resistência de forma que o dínamo de excitação em série que o alimenta não consegue fornecer a tensão necessária à alimentação do mesmo. Torna-se então necessário obter um acréscimo da tensão de alimentação, o que é feito por meio de agrupamento de uma segunda máquina, em série com a primeira, de forma que as tensões das mesmas se somem.

Para que o agrupamento da segunda máquina, em série com a primeira, se processe sem alterar o regime de funcionamento do circuito utilizador, é preciso que a máquina a ser agrupada possua as seguintes condições:

1.º — Que esteja em funcionamento, com velocidade normal.
2.º — Que produza uma corrente igual, em valor e sentido, da que circula na linha utilizadora.
3.º — Esta corrente deve ser produzida quando a tensão nos bornes da máquina é nula.
4.º — Pela razão antes mencionada, é necessário que a máquina a ser agrupada seja acionada e regulada com os bornes em curto-circuito.

Das considerações expostas conclui-se que, para inserir num circuito um dínamo de excitação em série, é preciso empregar um comutador especial, que permita acionar a máquina em curto-circuito, e inseri-la quando estiver em condições.

A Fig. 194 representa o esquema das ligações necessárias a realizar o agrupamento do dínamo G_2 em série com o G_1.

O gerador G_1 está em funcionamento, fornecendo a corrente I.

O comutador da máquina G_2 está na posição que permite a passagem direta da corrente I do gerador G_1 para o circuito de utilização, fechando ao mesmo tempo o gerador G_2 em curto-circuito. Para inserir a máquina G_2 procede-se da seguinte forma:

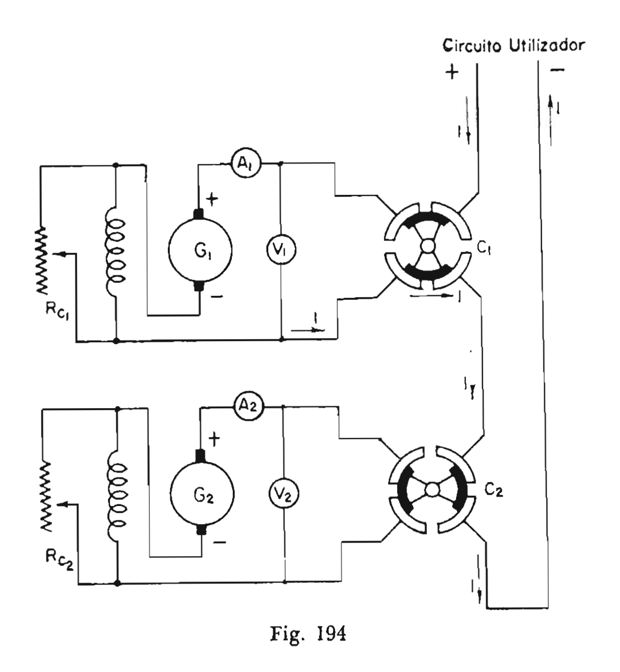


Fig. 194

1.º — Aciona-se a máquina regulando sua velocidade para o valor normal.

2.º — Regula-se sua excitação, por meio do reostato R_{c2}, até que o amperímetro A_2 indique o mesmo valor I da corrente fornecida pela outra máquina. Nestas condições o voltímetro V_2 indica zero e a f.e.m. produzida pela máquina compensa as quedas internas de tensão que se produzem na mesma, por efeito da corrente I.

3.º — Aciona-se o comutador C_2 de forma que fique na mesma posição do C_1. As duas máquinas resultam em série sem que o circuito utilizador tivesse ressentido qualquer perturbação.

Após a manobra descrita, o gerador G_2 não fornece potência alguma, sendo nula a tensão em seus bornes. Toda a tensão e potência necessárias ao circuito ainda estão sendo produzidas pelo gerador G_1.

Para que o gerador G_2 possa fornecer tensão e portanto potência elétrica, é necessário aumentar sua excitação, o que é feito por meio do reostato R_{c2}.

A divisão da carga entre as duas máquinas deve ser feita com manobra simultânea, a fim de que o circuito utilizador não sofra perturbações. Por isso, enquanto se aumenta a tensão da máquina G_2 deverá ser diminuída a de G_1, de forma que a soma $V_1 + V_2$ seja constantemente igual a V, a tensão do circuito utilizador.

A Fig. 195 representa as características das duas máquinas antes mencionadas e a respectiva divisão da carga.

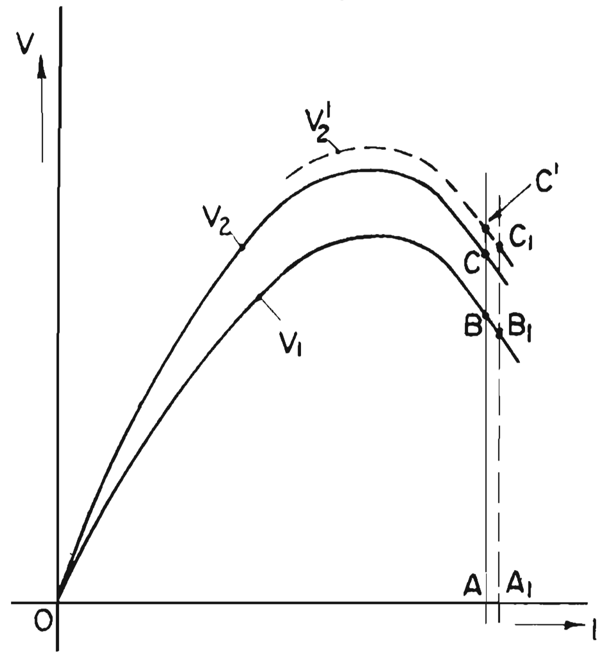


Fig. 195

Sendo a corrente igual para as duas máquinas ($I = OA$), a ordenada AC encontra a característica V_1 do gerador G_1 no ponto B e a V_2 do gerador G_2 no ponto C.

As ordenadas $AB = V_1$ e $AC = V_2$ representam as tensões existentes respectivamente nos bornes dos geradores G_1 e G_2. A tensão total, existente nos bornes do circuito utilizador, é representada pela soma das tensões mencionada, isto é,

$$V = V_1 + V_2 = AB + AC$$

Se, por exemplo, o gerador G_2 sofrer um aumento de velocidade ou de excitação, a característica externa do mesmo eleva-se (V'_2) e a tensão nos bornes do circuito tende a aumentar para o valor $V' = AB + AC'$. Este aumento de tensão provoca um aumento de corrente, resultando $I' = OA_1$ e a este novo valor da corrente corresponde uma tensão A_1B_1 pelo gerador G_1 e A_1C_1 pelo gerador G_2. A tensão existente nos bornes do circuito variou do valor $(AB + AC)$ para $(A_1B_1 + A_1C_1)$. Sendo $A_1B_1 < AB$ e $A_1C_1 > AC$, a tensão final fica aproximadamente igual à inicial.

Os fatos expostos provam ser estável o funcionamento de geradores com excitação em série, agrupados em série.

CAPÍTULO X

114 — Características dos motores de corrente contínua empregados para tração elétrica

Os motores destinados à tração elétrica devem possuir as seguintes características:

- Elevado conjugado de partida, sem que a corrente alcance valores excessivos.
- Regulação motora variável.
- Permitir o freio elétrico, possivelmente com recuperação da energia.
- Construção sólida e rendimento elevado.

Os motores de corrente contínua, que possuem estas características, são os de excitação em série. Tais motores, no momento da partida, produzem um campo magnético muito intenso e a torção $C = K \phi I$ necessária é produzida sem que a corrente adquira valores excessivos.

A regulação da velocidade dos motores de excitação em série pode ser feita por meio do próprio reostato de partida e por meio do agrupamento das bobinas de campo indutor. Esta dupla ação reguladora resulta fácil e sensível, tanto no regime de baixa velocidade como no de alta velocidade.

Conforme indica a Fig. 196, o conjugado produzido pelo motor com excitação em série diminui ao aumentar a velocidade e vice-versa. Assim sendo, no citado motor, após a partida, em que se necessita de elevado conjugado, esta última diminui automaticamente enquanto a velocidade aumenta. Numa sobrecarga, como por exemplo ocorre nos motores que acionam um veículo numa subida, o acréscimo de resistência mecânica que se opõe à rotação é facilmente vencido, pois o motor automaticamente diminui a velocidade, mantendo a potência absorvida quase constante.

Pelo exposto, conclui-se que o motor de excitação em série modifica a sua velocidade ao variar a carga, adaptando seu funcionamento às necessidades de serviço, sem provocar elevadas variações de corrente na linha que o alimenta.

Os motores de corrente contínua com excitação em derivação possuem velocidade constante ao variar a carga e por esta razão, quando sujeitos a cargas variáveis, absorvem da linha uma potência variável,

provocando considerável flutuação da corrente absorvida. Estes motores, inadequados para a tração elétrica, encontram aplicação nos ônibus elétricos, em virtude da facilidade com que realizam o freiamento com recuperação da energia, o que se dá nas descidas.

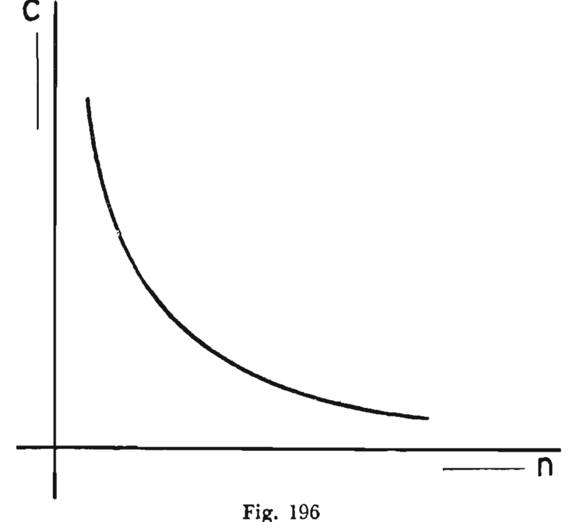


Fig. 196

115 – Potência dos motores de tração

A resistência a ser vencida por um motor de tração que aciona um veículo depende dos seguintes elementos:

a) Resistência de atrito.
b) Resistência devida às curvas.
c) Inclinação da estrada.
d) Resistência do ar.

A fim de tornar mais fácil a interpretação destes elementos e sua respectiva avaliação, os mesmos serão examinados separadamente, conforme exposto a seguir:

a) *Resistência de atrito* – A resistência oferecida por um veículo, que se movimenta num plano, em linha reta, com velocidade uniforme, é expressa em quilos por:

$$F^{kg} = P^{Ton} \cdot f^{kg/Ton}$$

Expressando o peso do veículo em toneladas, o coeficiente f, que depende do atrito volvente das rodas sobre os trilhos ou estrada e dos eixos nos mancais, é expresso em kg/Ton, sendo seus valores médios os indicados a seguir:

Trilhos normais em bom estado	f = 1 kg/Ton
Trilhos normais em condições ordinárias	f = 1,5 kg/Ton
Trilhos de garganta em condições ordinárias .	f = 12 até 15 kg/Ton
Pneus sobre estrada asfaltada	f = 15 até 20 kg/Ton
Pneus sobre estrada ordinária	f = 30 kg/Ton

b) *Resistência nas curvas* — Numa curva, por efeito da força centrífuga, aumenta a resistência de atrito entre as rodas e os trilhos ou entre rodas e estrada. Este aumento é proporcional à distância D entre as rodas, no sentido transversal do carro e inversamente proporcional ao raio da curva R, conforme Fig. 197. Resulta então:

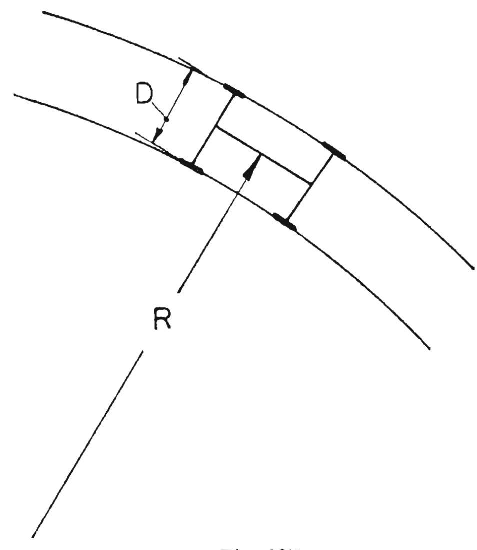


Fig. 197

$$F_c^{kg} = P^{Ton} \cdot f_1^{kg/Ton} =$$

$$= P^{Ton} \cdot K_1 \frac{D^m}{R^m}$$

onde K_1 pode ser considerada igual a 450.

c) *Resistência nas subidas* — Num trecho inclinado da estrada, o veículo apresenta uma componente de seu peso, na direção do movimento. Tal componente será no sentido do movimento ao se tratar de uma descida ou em sentido contrário ao movimento tratando-se de uma subida.

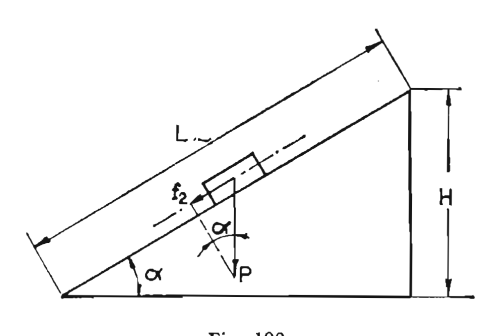


Fig. 198

Conforme Fig. 198, resulta:

$$f_2 = P \cdot \text{sen } \alpha = P \frac{H}{L}$$

Desejando-se f_2 expressa em kg, quando P for expressa em toneladas, resulta:

$$f_2 = P^{Ton} \frac{H^m \cdot 1000}{L^m}$$

O fator $\frac{H^m \cdot 1000}{L^m} = i$ representa a elevação da estrada, correspon-

dente ao percurso L de 1000 m, ou seja, a elevação em metros correspondente a cada quilômetro de percurso.

d) *Resistência do ar* — A resistência oferecida pelo ar, a um corpo em movimento, é expressa em quilos pela fórmula seguinte:

$$f_3 = K \cdot S \cdot v^2$$

na qual S é a área da seção transversal do veículo em m²; v é a velocidade em km/hora e K é um coeficiente que depende da forma da superfície sobre a qual o ar bate. Em geral, para veículos comuns e velocidades até 150 km/hora considera-se $K = 0{,}005$.

Assim sendo, a força total, expressa em quilos, necessária para movimentar um veículo de P toneladas, resulta:

$$F^{kg} = P\,(f + f_1 \pm f_2) + K \cdot S \cdot v^2 = P\,(f + K_1 \frac{D}{R} \pm i) + K \cdot S \cdot v^2$$

Conhecida a força em quilos necessária para movimentar o veículo, é possível calcular a potência correspondente a uma determinada velocidade v expressa em km/h, resultando:

$$\text{kgm/seg} = \frac{F \cdot v \cdot 1000}{3600} = \frac{F \cdot v}{3{,}6}$$

A potência necessária resulta:

$$\text{cv} = \frac{F \cdot v}{75 \cdot 3{,}6} = \frac{F \cdot v}{270}$$

$$W = \frac{F \cdot v \cdot 736}{270} = 2{,}73 \cdot F \cdot v$$

$$\text{kw} = 0{,}00273 \cdot F \cdot v$$

As várias fórmulas escritas expressam a potência necessária aos eixos do veículo. A potência do motor depende do rendimento da transmissão.

Exemplo — Um automóvel com peso de 1400 kg deve alcançar a velocidade de 50 km/h, numa estrada asfaltada com a elevação $i = 60$ m/km, com curvas cujo raio médio é $R = 150$ m. Qual será a potência fornecida pelo motor se o rendimento da transmissão for 0,8? Considere-se 1,5 m a distância entre as rodas do carro, no sentido transversal, e de 3 m² a área da seção transversal do veículo.

Solução:

A força que se opõe ao movimento do veículo é expressa por:

$$F = P\left(f + K_1 \frac{D}{R} + i\right) + K \cdot S \cdot v^2$$

Substituindo os valores numéricos, resulta:

$$F = 1{,}4\left(20 + 450 \frac{1{,}5}{150} + 60\right) + 0{,}005 \cdot 3 \cdot 50^2 = \sim 136 \text{ kg}$$

A potência fornecida pelo motor é dada em cv por:

$$cv = \frac{F \cdot v}{270 \cdot \mu} = \frac{156 \cdot 50}{270 \cdot 0{,}8} = \sim 36 \text{ cavalos}$$

116 — Características de construção dos motores de tração com corrente contínua

Os motores de tração são caracterizados pela construção compacta e pelo volume reduzido, pois o espaço disponível para os mesmos é sempre muito limitado.

A carcaça estatórica é de aço fundido, dividida ao longo de um plano diametral, a fim de facilitar a inspeção e eventuais reparos a serem feitos.

O motor deve ser de tipo blindado, devendo os cabos de alimentação penetrar no mesmo através de dispositivos especialmente vedados.

A tensão de alimentação é compreendida entre os seguintes limites:

— Bondes urbanos	500 até 600 volts
— Bondes interurbanos	1000 até 1200 volts
— Ferrovias	1500 até 4000 volts

A queda de tensão tolerável nas linhas de alimentação varia entre 10% e 15% do valor da tensão de alimentação. A tensão aplicada a cada motor não deve ser superior a 2000 volts. Para tensões de alimentação superiores à mencionada é preciso conetar os motores em série.

Para veículos alimentados com baterias de acumuladores, as tensões de exercício variam entre 80 e 120 volts.

A potência dos motores usados na tração elétrica depende das condições de serviço e varia, geralmente, entre os seguintes limites:

— Bondes urbanos	2 motores de 15 até 25 cv
— Bondes interurbanos	2 até 4 motores de 40 até 60 cv

Ferrovias:

a) Transmissão com engrenagens	4 até 12 motores de 150 até 300 cv
b) Transmissão com bielas	2 motores de 500 até 900 cv
Veículos com acumuladores	1 ou 2 motores de 5 até 30 cv

O enrolamento induzido é do tipo ondulado, resultando assim somente duas fileiras de escovas, dispostas de forma a serem facilmente acessíveis. Os motores de tração são quase sempre tetrapolares, providos de pólos auxiliares. As escovas estão colocadas em correspondência com a zona de inversão polar, permitindo assim o funcionamento em marcha-à-ré do veículo.

A troca das escovas e a limpeza do comutador são feitas através de uma janela apropriada, provida de tampa com fechamento hermético, facilmente removível. Os motores de tração possuem o comutador com elevado número de lâminas, o que obriga o uso de comutadores com diâmetro quase igual ao do induzido. Estes motores possuem regime variável de funcionamento e sua velocidade normal está compreendida entre 500 a 1000 r.p.m.

A transmissão do movimento, do motor para as rodas, é efetuada por meio de um par de engrenagens cilíndricas, conforme Fig. 199. O tipo de suspensão, feita por meio de buchas no próprio eixo da roda, permite ao motor oscilar sem porém variar a distância D entre o eixo motor e o eixo da roda. A mola M permite que a suspensão do motor seja elástica.

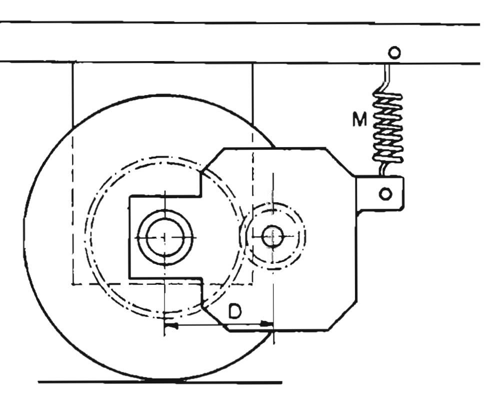


Fig. 199

A redução da velocidade, efetuada pelas engrenagens, varia geralmente entre 1:3 até 1:5. Para veículos acionados por baterias de acumuladores e para carrinhos destinados ao serviço interno das oficinas, adotam-se relações de transmissão que variam entre 1:7 até 1:20.

A montagem direta do motor sobre o eixo teria a vantagem de evitar a perda de energia nas engrenagens, mas obrigaria o uso de motores lentos e por conseguinte volumosos e de custo elevado.

Nas grandes locomotivas de ferrovias, os motores são montados sobre o chassis da máquina e a transmissão do movimento aos eixos das rodas é feita por meio de bielas.

117 — Partida e regulação da velocidade dos motores de tração elétrica

A regulação da velocidade de um veículo acionado por motores elétricos efetua-se agrupando-se os motores do mesmo, em série ou em paralelo, com ou sem resistências elétricas. As manobras de agrupamento, dos motores e das resistências, executam-se por meio de um dispositivo especial, comumente denominado contróler. Este é constituído por um cilindro rotativo, provido de uma série de contatos metálicos isolados, que deslizando por baixo de escovas fixas executam as ligações das diferentes partes dos circuitos, conforme foi visto na Fig. 155.

A cada posição da manivela do contróler corresponde um determinado agrupamento dos circuitos e portanto um determinado valor da rotação motora e conseqüentemente da velocidade do veículo.

118 — Freio sem e com recuperação da energia

O freio elétrico das locomotivas, com motores de excitação em série, pode ser realizado de duas maneiras diferentes, isto é:

1.º — Freio simples, que se executa desligando os motores da linha de alimentação e conetando-os com resistências, para que possam funcionar como geradores. Ao executar esta manobra é preciso inverter a ligação do circuito indutor com as escovas, a fim de aproveitar o efeito do magnetismo residual que permite a auto-excitação.

2.º — Freio com recuperação da energia, que se executa desligando o circuito indutor do motor, alimentando-o por meio de baterias de acumuladores. A máquina assim conetada funciona como dínamo de excitação separada, resultando apta a fornecer energia para a linha de alimentação enquanto freia o veículo.

ÍNDICE ALFABÉTICO E REMISSIVO

A

B

C

D

E

F

G

H

I

L

M

N

P

Q

R

S

T

U

V


EDITORA
GLOBO